

Modelado, análisis y diseño de una técnica de acoplo eficiente entre fibra óptica y circuitos integrados ópticos de silicio

Autor: Galán Conejos, Jose Vicente

Director: Dr. Sanchis Kilders, Pablo

Resumen — La fotónica sobre silicio está experimentando en la actualidad un gran desarrollo debido a que es posible conseguir circuitos integrados fotónicos de reducidas dimensiones y altas prestaciones. Sin embargo, el acoplo a fibra óptica con circuitos integrados ópticos de silicio es un aspecto clave debido, principalmente, a la gran diferencia en las dimensiones de las secciones de las fibras ópticas y los circuitos integrados. Un acoplo directo entre una guía de silicio y una fibra óptica monomodo estándar introduce más de 20dB de pérdidas de acoplo en el interfaz con la fibra. Existen básicamente dos técnicas de acoplo eficientes usadas actualmente: el acoplo vertical con *grating coupler* y el acoplo horizontal con *inverted taper*. En el presente trabajo se diseña detalladamente una estructura de acoplo eficiente basada en *inverted taper*. El trabajo engloba tanto el análisis y diseño de la estructura como la fabricación y caracterización experimental de la misma.

Abstract — Nowadays, silicon photonics is experiencing a high development due to the possibility to achieve low dimensions and high performance photonic integrated circuits. However, coupling to the optical fiber is a key point in silicon photonics due to the high differences between the dimensions in the sections of the fiber and the photonic integrated circuits. A direct coupling between a silicon waveguide and a standard single-mode fiber means more than 20dB coupling losses in the fiber interface. Basically, two kinds of efficient coupling techniques are used: vertical coupling by means of grating couplers, and horizontal coupling using inverted tapers. In this work, an inverted taper-based efficient coupling structure is designed in detail. Analysis, design, fabrication and characterization are reported.

Autor: Galán Conejos, Jose Vicente, email: jogaco@ntc.upv.es

Director: Dr. Sanchis Kilders, Pablo, email: pabsanki@dc.com.upv.es

Fecha de entrega: 07-09-07

ÍNDICE

I. Introducción	5
I.1. Motivación.....	5
I.2. Objetivos.....	7
II. Tecnología de silicio en Circuitos Integrados Ópticos	7
II.1. Tecnología SOI (Silicon On Insulator).....	8
II.2. El problema del acoplo a fibra óptica.....	11
II.3. Acoplo eficiente a fibra óptica: técnicas de acoplo vertical y horizontal	16
III. Diseño de la estructura de acoplo basada en inverted taper	19
III.1. Estructura propuesta.....	19
III.2. Diseño del interfaz con la fibra óptica	21
III.3. Diseño del taper	22
III.4. Análisis Espectral.....	26
IV. Fabricación y medidas	27
IV.1. Proceso de fabricación.....	28
IV.2. Montaje experimental para la caracterización.....	32
IV.3. Fabricación y medidas del prototipo fabricado.....	35
V. Conclusiones	40
VI. Trabajo futuro	41
VII. Apéndice: Publicaciones	45
Agradecimientos	47
Bibliografía	49
Anexos	51

I. Introducción.

El presente trabajo aborda el diseño, modelado y caracterización de una estructura eficiente de acoplo entre fibra óptica y circuitos integrados ópticos de silicio. En esta breve introducción se presenta la necesidad de estructuras eficientes de acoplo en la fotónica sobre silicio, así como los objetivos principales de este trabajo.

I.1. Motivación.

La capacidad de las redes de comunicaciones ha aumentado considerablemente mediante la incorporación de la tecnología óptica en los enlaces entre nodos de red. Sin embargo, las principales funciones de dichos nodos, tales como el encaminamiento o enrutamiento, continúan realizándose en el dominio eléctrico, lo que supone un importante cuello de botella a la hora de hacer frente a la demanda creciente de capacidad (véase Fig. 1.1). Por ello, se están realizando grandes esfuerzos a nivel mundial para el desarrollo de tecnología óptica en los nodos de red, permitiendo así el desarrollo de redes todo ópticas con dispositivos fotónicos de muy altas prestaciones [1].

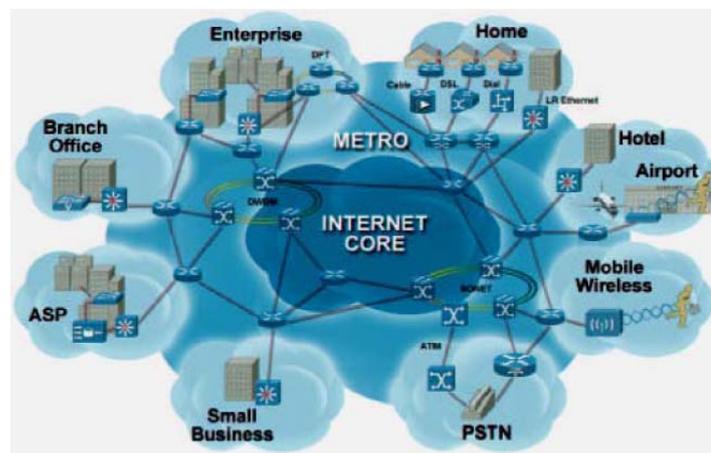


Fig. 1.1. Esquema de una red de telecomunicaciones. Un conjunto de nodos se comunican por medio de enlaces. Las principales funciones de dichos nodos de red, tales como el encaminamiento o enrutamiento, continúan realizándose en el dominio eléctrico.

Las tecnologías fotónicas basadas en materiales semiconductores como el arseniuro de Galio (GaAs) o el fosforo de Indio (InP) tuvieron inicialmente un mayor desarrollo para la fabricación de dispositivos fotónicos. La razón principal fue que era mucho más sencillo implementar fuentes de

luz y dispositivos activos con estos materiales. Sin embargo, durante estos últimos años están apareciendo nuevas tecnologías basadas en silicio para el desarrollo de dispositivos fotónicos [2].

La principal ventaja de la tecnología de silicio es su compatibilidad con los procesos de fabricación CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) utilizados en la industria microelectrónica permitiendo así la producción a gran escala de componentes de bajo coste. Importantes compañías a nivel mundial, tales como Intel o IBM, han incluido dicha tecnología entre sus principales líneas de investigación [3][4]. Además, recientemente se han propuesto varias estructuras para la implementación de fuentes de luz basadas exclusivamente en silicio [5]. Una de las tecnologías más esperanzadoras de fabricación de estructuras ópticas basadas en silicio es la denominada tecnología SOI (del inglés Silicon on Insulator).

El elemento clave en un circuito integrado SOI es la guía óptica, ya que proporciona el interfaz de entrada y salida entre el dispositivo y la fibra óptica. Uno de los aspectos clave en cualquier dispositivo fotónico implementado con esta tecnología es un acoplo eficiente al mundo exterior, es decir, a fibra óptica. La Fig. 1.2 ilustra el acoplo a fibra óptica en dispositivos fotónicos mediante guías de entrada y salida.

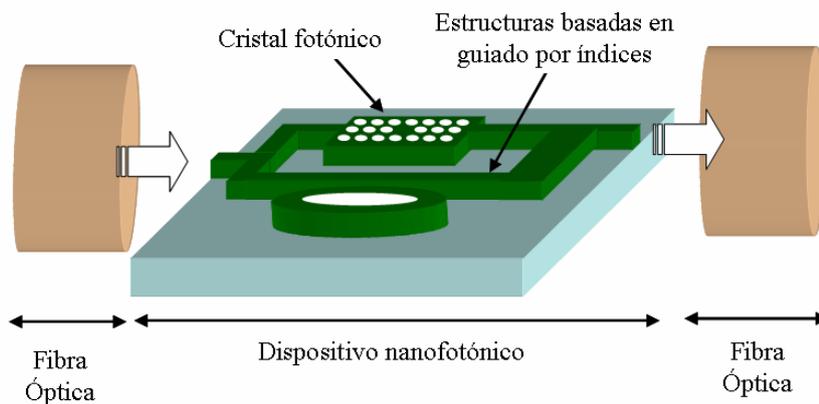


Fig. 1.2. Acoplo a fibra óptica en dispositivos fotónicos mediante guías de entrada y salida.

El acoplo directo entre fibra óptica y guías ópticas de silicio resulta altamente ineficiente debido a la desadaptación del perfil modal en ambas estructuras. El modo guiado en una fibra óptica monomodo estándar suele ser circular con un diámetro en torno a 8-10 μm . Por otra parte, el modo en las guías de silicio suele ser rectangular y con unas dimensiones en torno a 200 nm x 500 nm para conseguir así guías monomodo. Tal desadaptación entre los perfiles de los modos fundamentales de ambas estructuras se traduce en más de 20dB de pérdidas de acoplo. Es, por tanto, necesario el desarrollo de técnicas eficientes de acoplo en el interfaz entre la fibra óptica y el circuito integrado con esta tecnología.

I.2. *Objetivos.*

El objetivo principal del presente trabajo es el análisis, implementación y caracterización de una técnica de acoplo a fibra óptica eficiente para dispositivos fotónicos de silicio. El trabajo realizado comprende análisis, simulación, fabricación y caracterización experimental. A continuación se describen los objetivos más específicos:

- Análisis y diseño de la estructura de acoplo propuesta: Los parámetros más importantes que determinan dicha estructura se simulan y analizan en detalle para conseguir máximo acoplo a una longitud de onda de 1550nm en tercera ventana.
- Fabricación de los prototipos diseñados: La fabricación de los prototipos diseñados se ha llevado a cabo en las instalaciones del Centro de Tecnología Nanofotónica mediante técnicas de litografía basada en haz de electrones y ataque inductivo de plasma.
- Puesta en marcha de montajes de caracterización: Se presenta el montaje que permitirá la medida experimental en el laboratorio de la técnica de acoplo diseñada.
- Caracterización y medida de prestaciones de los prototipos fabricados: Una vez puesto en marcha el montaje de caracterización, se caracterizan las estructuras fabricadas y se miden los parámetros más importantes tales como las pérdidas de acoplo y ancho de banda.

Los resultados obtenidos servirán como realimentación de las etapas de diseño y fabricación.

El resultado final del proyecto será la incorporación de dicha técnica de acoplo en la fabricación de cualquier prototipo, permitiendo así una mejor y más óptima caracterización de la funcionalidad implementada por dicho prototipo sin la influencia de un acoplo ineficiente.

II. Tecnología de Silicio en Circuitos Integrados Ópticos.

En los últimos años, la microelectrónica en silicio ha experimentado un éxito rotundo en las redes de telecomunicaciones debido, principalmente, a la gran disponibilidad y buenas propiedades térmicas y mecánicas del silicio como semiconductor y al desarrollo de procesos de tecnología dominantes como la tecnología CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Sin embargo, existe un cuello de botella en las limitaciones en las velocidades de operación de los circuitos integrados microelectrónicos. En [6] se afirma que la microelectrónica no será capaz en un futuro de poder desarrollar circuitos que puedan operar a más de 40Gbps. Las principales características de la tecnología fotónica son una mayor velocidad de operación frente a dispositivos microelectrónicos y un mayor ancho de banda.

Pese a encontrarnos en la actualidad en los principios de esta tecnología, los avances y esperanzas futuras de la fotónica son numerosos. Por su compatibilidad con los procesos CMOS de la microelectrónica, y por un menor coste del material (silicio) frente a otros materiales como son el fosforo de Indio (InP) o el arseniuro de Galio (GaAs), las tecnologías fotónicas de silicio son las

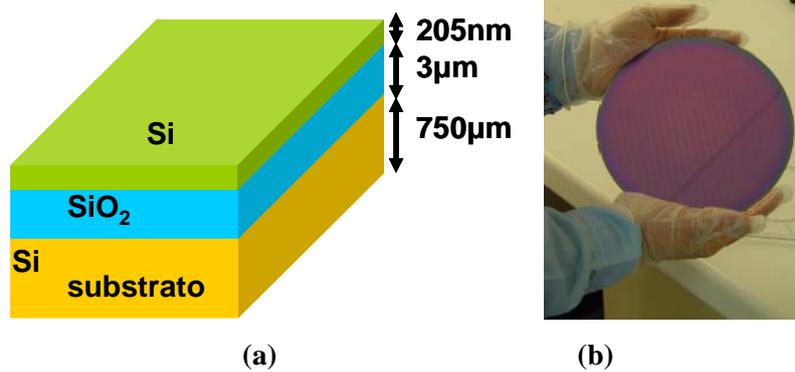
candidatas a poder en un futuro sustituir la tecnología microelectrónica por tecnología fotónica de mayores prestaciones y velocidades de procesado.

Numerosos dispositivos pasivos sobre esta tecnología han sido ya desarrollados [7]. Además, grandes avances en el desarrollo de dispositivos ópticos activos en silicio han sido también publicados recientemente [8]. Sin embargo, uno de los principales problemas del silicio como semiconductor es su bajo coeficiente electro-óptico, lo que dificulta al máximo la utilización de este material para la construcción de fuentes emisoras de luz como los láseres o diodos. En la actualidad, grandes empresas a nivel mundial como IBM o Intel han demostrado un gran interés en en la tecnología fotónica, y más concretamente en el desarrollo de fuentes emisoras de luz en silicio [9]. Una de las tecnologías ópticas de fabricación basadas en silicio más desarrolladas es la tecnología SOI (Silicon On Insulator). Sobre esta tecnología van a basarse los diseños de la estructura de acoplo que va a desarrollarse en este trabajo.

II.1. Tecnología SOI (*Silicon On Insulator*).

En la Figura 2.1 se ilustra un corte transversal de una oblea SOI donde se observa las distintas capas que forman la misma (Fig. 2.1a), así como el aspecto de una oblea SOI comercial (Fig. 2.1b). El material que hace de núcleo de las estructuras es silicio (Si), cuyo índice de refracción se encuentra en torno a $n=3.5$ a una longitud de onda de 1550nm. El espesor de esta capa de las obleas SOI con las que trabajamos habitualmente es de 205nm. Debajo de esta capa de silicio se encuentra una capa de óxido de silicio (SiO_2) cuyo índice de refracción se encuentra en torno a $n=1.5$ también para una longitud de onda de 1550nm. El espesor de la capa de SiO_2 de nuestras obleas es de $3\mu\text{m}$. Esta capa hace el papel de cubierta de las estructuras ópticas. En la parte inferior de la oblea se encuentra un substrato, también de silicio, de espesor en torno a las $750\mu\text{m}$.

La característica más importante de esta tecnología es el alto contraste existente entre los materiales del núcleo y la cubierta. Este contraste o diferencia entre índices ($\Delta n \sim 2$) se traduce en un muy alto confinamiento de la luz en el núcleo de las estructuras ópticas. Este alto confinamiento es la clave de poder desarrollar dispositivos compactos de dimensiones reducidas, y poder así reducir las dimensiones de los circuitos integrados, lo cual es la base de poder fabricar chips a gran escala y poder incluir dentro de una misma oblea miles de ellos.



Gracias al alto contraste es posible realizar dispositivos compactos con radios de curvatura del orden de los micrómetros. En la Fig. 2.2 se ilustra un filtro *add-drop* realizado en tecnología SOI, donde puede observarse que pueden conseguirse radios de curvatura en torno a 5 μm sin que parte de la luz se radie al exterior al pasar por la curvatura. En tecnologías de bajo contraste, debido a que el confinamiento en el núcleo es débil, los radios de curvatura que pueden conseguirse se encuentran en torno a los milímetros [8].



Uno de los elementos clave en un circuito integrado en tecnología SOI es la guía óptica. La guía óptica proporciona la comunicación con el mundo exterior de los circuitos integrados ópticos. Tanto el acoplo de luz de la fibra al circuito integrado, como la extracción de luz del mismo se realiza por medio de guías. En la Fig. 2.3 se ilustra el aspecto de una guía óptica en tecnología SOI sobre una oblea comercial como la ilustrada en la Fig. 2.1. Puesto que en estas obleas comerciales la altura de la capa de Silicio (h) suele ser en torno a 200 nm, la anchura de la guía (w) ha de ser de 500 nm para conseguir propagación monomodo.

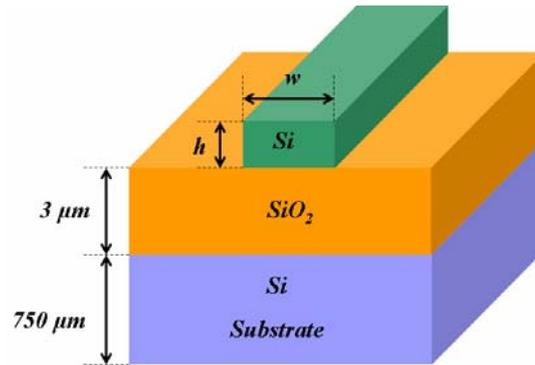


Fig. 2.3. Detalle de una guía en tecnología SOI. Puesto que en las obleas SOI comerciales que se han utilizado $h=205\text{nm}$, la anchura de la guía (w) ha de ser de 500nm para conseguir propagación monomodo.

En la Figura 2.4 se ilustra el aspecto del campo eléctrico del modo fundamental de una guía SOI de 500nm de anchura para polarización TE (Fig. 2.4a) y polarización TM (Fig. 2.4b). Se puede observar cómo el confinamiento en el núcleo es mayor para polarización TE. Esto es debido a la orientación del campo eléctrico en ambas polarizaciones (ver Fig. 2.4). Por este motivo se suele trabajar con polarización TE en circuitos integrados sobre esta tecnología.

Gracias al alto contraste de esta tecnología es posible, por tanto, realizar guías monomodo de reducidas dimensiones (500nm de anchura y 205nm de altura). Sin embargo, y puesto que queremos utilizar dichas guías para acoplar luz de la fibra óptica al circuito integrado, existe una gran diferencia entre las dimensiones de la fibra óptica (estructura circular, y de unas $10\mu\text{m}$ de diámetro para una fibra monomodo estándar) y una guía óptica monomodo SOI como la de la Fig. 2.3 (estructura rectangular, de anchura 500nm y 205nm de altura). En la Fig. 2.5 se ilustra a escala la diferencia en las dimensiones de las secciones de una fibra óptica monomodo estándar y una guía óptica monomodo SOI.

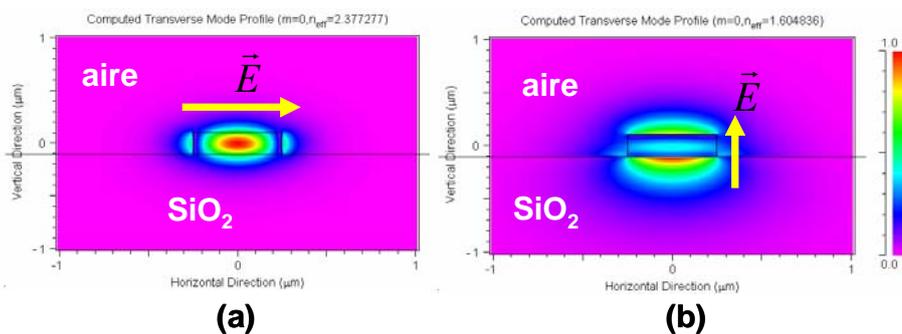


Fig. 2.4. Aspecto del modo fundamental de una guía SOI de 500nm de anchura para polarización TE (a) y TM (b).

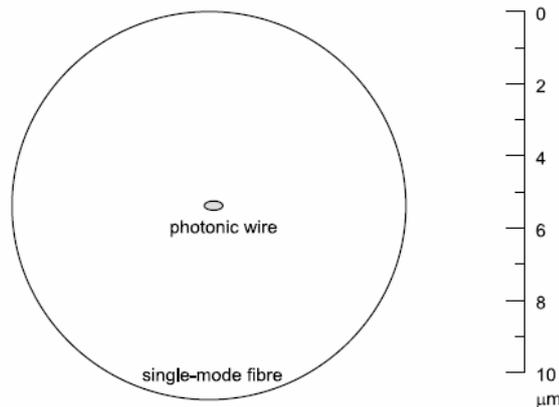


Fig. 2.5. Ilustración a escala de las diferencias en las dimensiones de las secciones de una fibra monomodo estándar y una guía monomodo SOI.

La gran diferencia en las dimensiones entre una fibra y una guía, ilustradas en la Fig. 2.5, se traduce en la existencia de una gran desadaptación entre los perfiles de los modos fundamentales de propagación de ambas estructuras, lo que se traduce en unas elevadas pérdidas de acoplo en el interfaz entre ambas. Además, existe otra desadaptación adicional debida al contraste entre índices del núcleo y cubierta. Una guía SOI es de alto contraste. Sin embargo, una fibra óptica posee un contraste bajo entre el núcleo y la cubierta de la misma. Esta diferencia en el contraste se traduce en una desadaptación adicional en las constantes de propagación de los modos de ambas estructuras. En la siguiente sección se trata más detalladamente el problema del acoplo entre guías SOI y fibra óptica, y las soluciones adoptadas con tal de solucionar tal grave problema.

II.2. El problema del acoplo a fibra óptica.

Cuando la luz proveniente de una fibra incide sobre el extremo de una guía SOI, la eficiencia con que la luz es acoplada a dicha guía es una función que depende de varios parámetros, como por ejemplo [10]:

- La desadaptación debida a la diferencia entre los perfiles de los campos del modo de la guía y de la fibra óptica.
- La desadaptación modal entre ambos modos debido al diferente contraste de índices.
- La calidad del corte en el extremo de la guía.
- El desalineamiento espacial entre los campos de la guía y de excitación de entrada.

La calidad del corte en el extremo de la guía y el desaliniamiento espacial entre la fibra y la guía son factores que no se pueden estimar matemáticamente y que influirán en la medida óptica final una vez fabricado el dispositivo. Sin embargo, la desadaptación entre los perfiles de los campos de los modos en la fibra y en la guía, puede ser evaluada mediante la integral de solape. Para el acoplo entre una fibra y una guía, ambas monomodo, la integral de solape se define como [11]:

$$\eta = \frac{\left| \iint_S \vec{E}(x, y) \times \vec{H}_{fib}^*(x, y) dx dy \right|^2}{\text{Re} \left\{ \iint_S \vec{E}(x, y) \times \vec{H}^*(x, y) dx dy \iint_S \vec{E}_{fib}(x, y) \times \vec{H}_{fib}^* dx dy \right\}} \quad (1)$$

donde $\{\vec{E}, \vec{H}\}$ y $\{\vec{E}_{fib}, \vec{H}_{fib}\}$ son los campos eléctrico y magnético del modo fundamental de la guía y la fibra respectivamente y S es la región de integración definida en el plano que define el interfaz de separación entre ambas estructuras, como se indica en la Fig. 2.6.

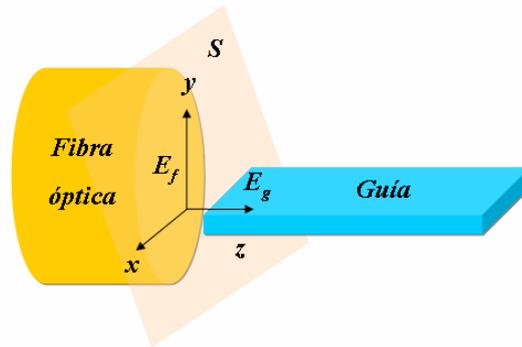


Fig. 2.6. Definición de la región de integración, S , de la integral de solape entre los perfiles de los modos fundamentales de la fibra y la guía.

La ecuación (1) únicamente es exacta en medios uniformes y en estructuras de guiado débil, como las fibras ópticas, puesto que no tiene en cuenta la reflexión en el interfaz entre la fibra y la guía. Al existir diferencias en el contraste entre índices en ambas estructuras, existirá reflexión y la eficiencia de acoplamiento será menor a la definida la ecuación (1). Además del efecto de la reflexión en el interfaz entre la guía y la fibra, siempre existirá un error adicional debido a que siempre va a existir un hueco de aire entre la fibra y la guía que aunque se podrá minimizar acercando al máximo la fibra a la guía, nunca se va a poder eliminar por completo.

Las pérdidas de acoplo, L_c , entre una fibra óptica y una guía bajo la aproximación de la ecuación (1), se pueden estimar finalmente como:

$$L_c (dB) = 10 \cdot \log \eta \quad (2)$$

En la ecuación (1), para la estimación de los campos en la guía pueden usarse programas de simulación aptos para el cálculo de modos de propagación de estructuras ópticas. Nosotros utilizamos el software *BeamPROP*, de *RSOFT Design Group*, y que implementa el método BPM (Beam Propagation Method) para el cálculo de los modos de propagación, y cuyo fundamento básico se explica en [12].

Para la estimación de los campos del modo fundamental en la fibra monomodo, puede usarse la aproximación por un pulso gaussiano según las expresiones [13]:

$$E_{fib}(x, y) \approx E_{max} \cdot e^{-\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right)} \quad (4)$$

$$H_{fib}(x, y) \approx \frac{n_{eff}}{Z_0} E_f(x, y) \quad (5)$$

donde ω_0 corresponde al radio del pulso gaussiano (definido como el radio para el cual el valor del pulso cae a $1/e$ de su valor máximo), n_{eff} se corresponde con el índice efectivo del modo en la fibra, y Z_0 es la impedancia característica del vacío. En la Fig. 2.7a se representa el campo eléctrico normalizado correspondiente a un pulso gaussiano como el de la ecuación (4).

Un parámetro muy característico de las fibras ópticas es el diámetro de campo modal (Mode Field Diameter, MFD) que se corresponde con el doble del radio del pulso gaussiano, ω_0 , de la ecuación (4): $MFD=2\omega_0$. Este valor puede consultarse en catálogos comerciales de fibra óptica, y tiene un valor de unas $10\mu m$ para una fibra monomodo estándar a una longitud de onda de $1550nm$. El significado del parámetro MFD se ilustra en la Fig. 2.7b.

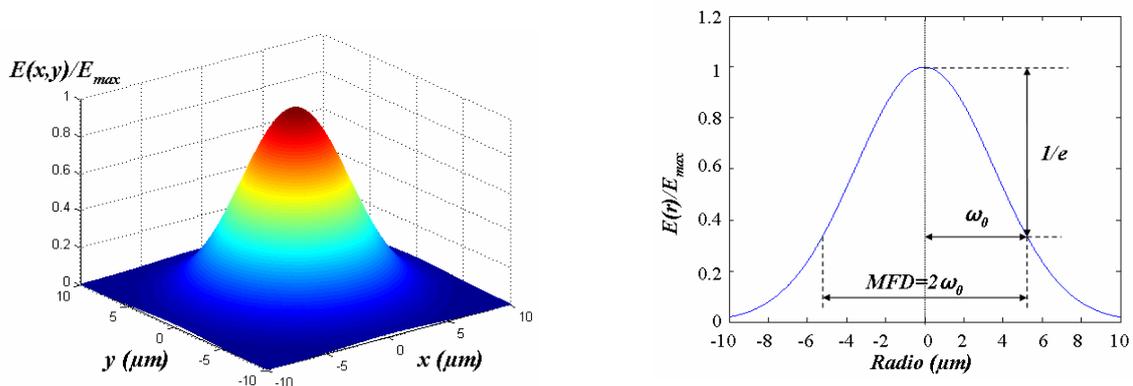


Fig. 2.7. a) Representación gráfica de la ecuación (4) de un pulso gaussiano normalizado. b) Corte transversal de la gráfica donde se representan los parámetros ω_0 y MFD ($MFD=2\omega_0$).

Aproximando, entonces, los campos del modo fundamental de la fibra por un pulso gaussiano según las ecuaciones (4) y (5), y obteniendo los campos del modo fundamental de la guía mediante simulación con el método BPM, es posible encontrar gráficas que relacionan las pérdidas de acoplo con el MFD de la fibra óptica según la expresión (2). En la Fig. 2.8 se muestra las pérdidas de acoplo a una guía SOI de 500nm de anchura en función del diámetro del campo del modo de la fibra, ó MFD, y para ambas polarizaciones TE y TM. Para una fibra monomodo estándar (MFD=10 μ m) las pérdidas de acoplo obtenidas mediante la integral de solape son de más de 20dB para polarización TE y de más de 15dB para polarización TM. Como se explicó anteriormente, la eficiencia de acoplamiento así calculada no tiene en cuenta la reflexión en el interfaz de separación entre la fibra y la guía y que forzará a que las pérdidas reales de acoplo sean aún mayores de lo obtenido.

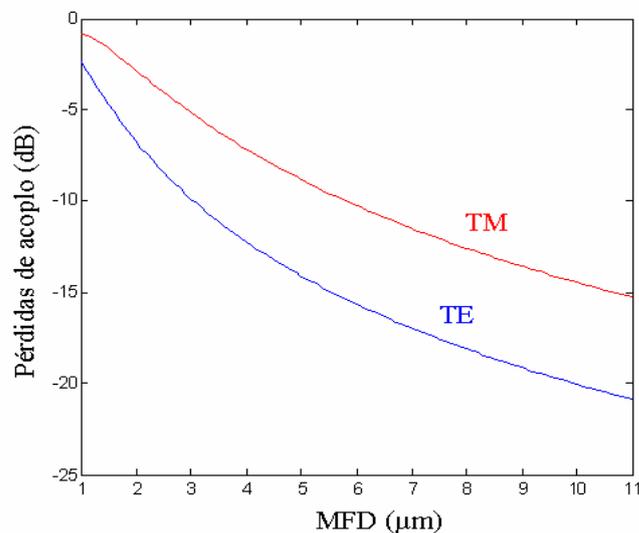


Fig. 2.8. Pérdidas de acoplo entre una guía SOI monomodo de 500nm de anchura y una fibra óptica en función del MFD de la fibra para las polarizaciones TE y TM.

Es posible utilizar fibras de menor MFD para reducir las pérdidas de acoplo. Un ejemplo son las lensed fiber, que consisten en fibras de núcleo más reducido que las fibras monomodo estándar, y cuyo aspecto se ilustra en la Fig. 2.9. Con el uso de lensed fibers de menor MFD, las pérdidas de acoplo se reducen considerablemente, como puede observarse en la gráfica de la Fig. 2.8. Sin embargo este tipo de fibras son mucho más caras que las fibras monomodo estándar, y no son aptas para su empleo en futuros sistemas de comunicaciones ópticas que incorporen dispositivos todo ópticos en tecnología SOI.

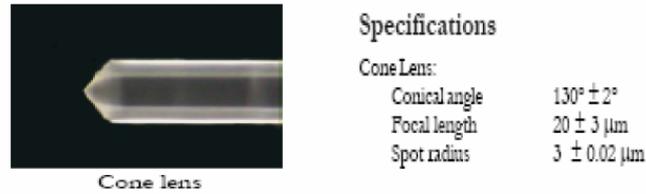


Fig. 2.9. Aspecto y principales parámetros de una lensed fiber.

Otro efecto importante en un acoplo ineficiente entre una fibra y una guía es el denominado efecto Fabry-Perot. Cuando una guía ineficientemente acoplada es alimentada por una señal óptica, la señal de entrada se refleja en la cara de entrada de la guía, debido a la reflectividad R de dicha cara. En el otro extremo, la señal llega atenuada por las pérdidas de propagación de la guía, y se vuelve a producir el mismo efecto que en la entrada, reflejándose de nuevo señal hacia la entrada. Este efecto se produce de nuevo al llegar dicha señal reflejada nuevamente a la entrada de la guía y se repite reiteradamente hacia ambos sentidos de propagación de la guía. Se forma así infinidad de cavidades en el interior de la guía semejantes a la cavidad de un láser. Este efecto se conoce con el nombre de cavidad Fabry Perot y se ilustra en la figura 2.10. El efecto de la cavidad Fabry-Perot que se forma en el interior de la guía, produce en la potencia óptica a la salida de la guía unas oscilaciones cuya forma depende tanto de la constante de pérdidas de propagación de la guía, α , como de la reflectividad en ambos extremos de la guía, R , y de la longitud de la guía, L . Estas oscilaciones distorsionan la señal a la salida de la guía.

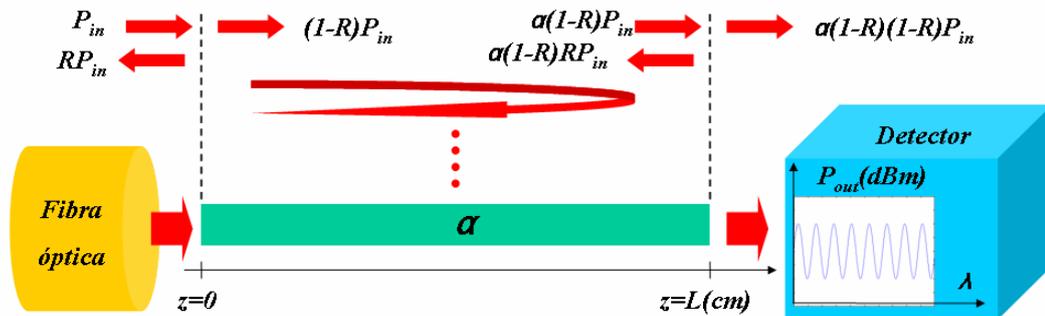


Fig. 2.10. Efecto de la cavidad Fabry-Perot que se forma en una guía ineficientemente acoplada a fibra óptica.

Por tanto, a parte de las pérdidas de acoplo provocadas por la desadaptación de los perfiles de los modos fundamentales de la fibra y la guía, y que puede solucionarse con el empleo de fibras de menor MFD como las lensed fiber, existe otro problema en el acoplo ineficiente debido a la formación de cavidades Fabry-Perot en el interior de la guía que se deben principalmente a la reflectividad existente en los extremos de la guía. Este efecto no se puede eliminar con el empleo

de fibras de menor diámetro. Vemos, por tanto, la necesidad de desarrollar técnicas de acoplo eficientes entre guías monomodo SOI y la fibra óptica.

II.3. Acoplo eficiente a fibra óptica: técnicas de acoplo vertical y horizontal.

Básicamente existen dos formas de acoplar luz a una guía SOI: de forma vertical por la superficie de la guía ó de forma horizontal por uno de sus extremos [10]. En la Fig. 2.11 se muestran dos de las técnicas más utilizadas para acoplo vertical: acoplo con prisma y acoplo con grating coupler (Fig. 2.11a y 2.11b respectivamente) y dos de las técnicas más empleadas para el acoplo horizontal: Técnicas Butt-coupling y End-fire coupling (Fig. 2.11c y 2.11d respectivamente).

Respecto al acoplo vertical, el acoplo mediante prisma (Fig. 2.11a) no es muy usado en tecnología SOI. La técnica de acoplo vertical más utilizada es, por tanto, el grating coupler.

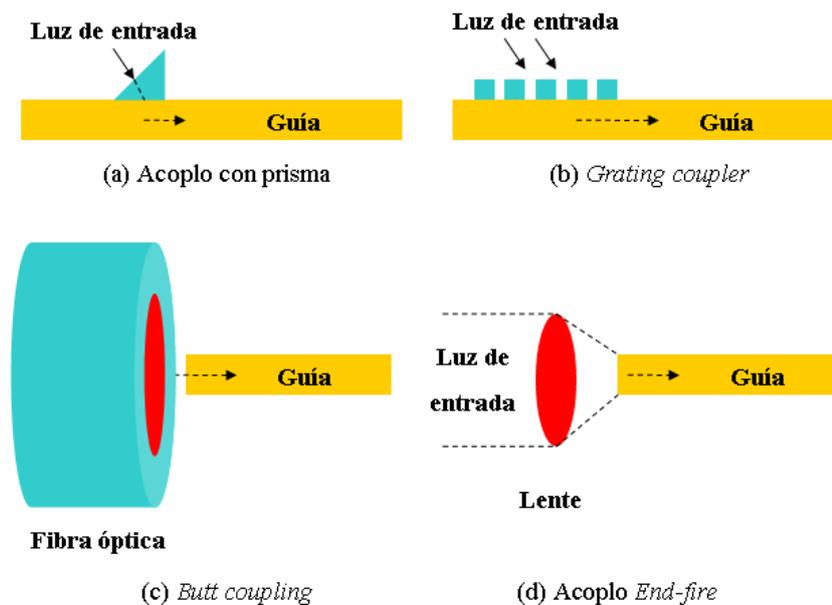


Fig. 2.11. Cuatro técnicas de acoplo de luz a guías ópticas. (a) y (b) Acoplo vertical, (c) y (d) acoplo horizontal.

El acoplo mediante grating coupler consiste en la fabricación sobre la superficie de la guía de una estructura periódica, tal como se muestra en la Fig. 2.12. Dicha estructura periódica se comporta como una red de difracción de Bragg mediante la que se consigue que la luz acople hacia el interior de la guía [14].

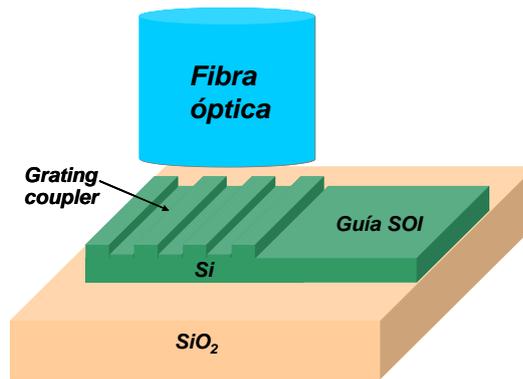


Fig. 2.12. Acoplo vertical con grating coupler.

Un grating coupler sobre guía de silicio consigue una eficiencia de acoplo típica de en torno al 30% [15]. El ancho de banda a 1dB típico característico de un grating coupler es de unos 40nm [15]. Numerosos esfuerzos se han puesto en poder mejorar esta eficiencia de acoplo con grating coupler. En [16] se propone un diseño más complejo para poder obtener una eficiencia de acoplo de cerca del 69%. Sin embargo, la fabricación de tal prototipo es costosa y el ancho de banda del grating sigue siendo limitado. Actualmente se está también investigando el acoplo con grating couplers de metal, como por ejemplo los grating couplers con oro, propuestos en [17]. La fabricación de este tipo de gratings con metal es mucho más sencilla y las eficiencias de acoplo conseguidas de momento (34%) son parecidas a las conseguidas con los primeros grating couplers en silicio.

Respecto al acoplo horizontal, las técnicas Butt coupling (Fig. 2.11c) y End-fire coupling (Fig. 2.11d) son muy similares, y consistentes en la inyección de luz por un extremo de la guía. En el punto anterior se evaluó las elevadas pérdidas de acoplo existentes en el acoplo directo entre una fibra y una guía SOI (equivalente a la técnica de Butt coupling de la Fig. 2.11c). Por tanto la técnica más utilizada de acoplo horizontal es la técnica End-fire, donde mediante lentes se intenta focalizar la luz de salida de la fibra hacia la guía para disminuir así las pérdidas de acoplo (ver Fig. 2.11d). Sin embargo, el empleo de lentes espaciales para focalizar la luz, como se ilustra en la Fig. 2.11d, no es particularmente atractivo en óptica integrada. El objetivo es desarrollar técnicas End-fire que emulen el efecto de la lente para focalizar la luz hacia la guía de entrada del circuito integrado. Una de las técnicas End-fire más estudiadas y eficientes es la denominada inverted taper. El aspecto de un inverted taper se ilustra en la Fig. 2.13.

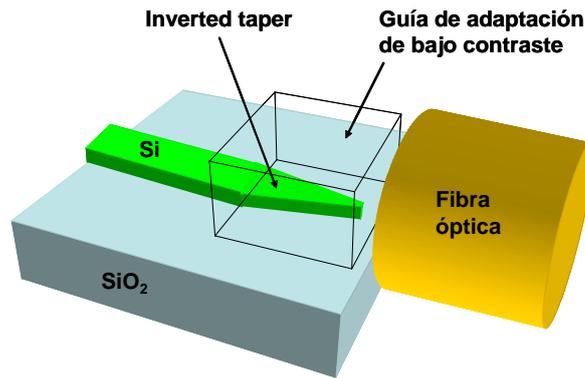


Fig. 2.13. Acoplo horizontal End-fire con inverted taper.

La técnica inverted taper consiste en continuar la guía de entrada/salida del circuito integrado con una estructura que vaya disminuyendo su sección conforme se acerca al extremo por el que acopla la fibra óptica. El efecto que se produce en dicho estrechamiento (o taper) es que el modo que se propaga por tal estructura, en lugar de confinarse en la guía, empieza a deslocalizarse del núcleo de la misma y a ensancharse debido a la pequeña sección del taper. Suele utilizarse una guía de bajo contraste dispuesta en la parte superior del taper para facilitar el guiado conforme el modo se va expandiendo, como se ilustra en la Fig. 2.13. En función de la longitud del taper y de la sección de su extremo se pueden conseguir perfiles modales lo suficientemente ensanchados en el extremo que acoplen eficientemente con la fibra óptica. Diferentes configuraciones con inverted taper han sido estudiadas en [18-22]. Tapers en 3D que varían la sección de la guía tanto en altura como en anchura han sido propuestos en [18]. Estructuras más complejas como dos tapers juntados en diferentes capas han sido también estudiados en [19]. Sin embargo, la complejidad en la fabricación de tales estructuras 3D es muy grande. Una solución más elegante y compacta y que además es compatible con las técnicas de fabricación planares es el empleo de tapers 2D [20-22], cuya altura es constante y que únicamente varían gradualmente la anchura de la guía (como el ilustrado en la Fig. 2.13). Este tipo de estructuras se caracterizan por una muy buena eficiencia de acoplo a fibra y por su elevado ancho de banda. Se han demostrado pérdidas de acoplo menores a 1dB en [22]. Sin embargo, suelen emplearse fibras de núcleo más reducido como las lensed fibers para acoplar a un circuito integrado usando inverted taper.

Ambas técnicas de acoplo tanto vertical, como el grating coupler, u horizontal End-fire, como el inverted taper, tienen sus ventajas e inconvenientes, por lo que a priori, ambas técnicas de acoplo pueden ser igualmente consideradas para acoplar eficientemente con la fibra óptica. Un grating coupler es relativamente fácil de fabricar y además resulta muy atractivo para el testeo de los distintos circuitos integrados del interior de una oblea. Por el hecho de alimentar el circuito de forma vertical, los distintos chips pueden ser testeados sin necesidad de ser cortados y separados unos de otros de la oblea original. Además, con diseños complejos como el propuesto en [16] se

pueden conseguir eficiencias de acoplo de un 69%, aunque a costa de un proceso complicado de fabricación. Sin embargo, tienen el problema de ser sensibles a la polarización, por lo que un diseño optimizado para polarización TE no serviría para polarización TM. Por el contrario, una estructura basada en inverted taper suele ser más complicada de fabricar, pero se puede diseñar para que sea transparente a la polarización de la señal de entrada. Además, una solución de acoplo horizontal con inverted taper resulta más atractiva para ser incorporada a un diseño final que vaya a ser encapsulado y conectorizado para ser comercializado. Sin embargo, los chips han de ser cortados y separados unos de otros de la oblea original para ser testeados en el laboratorio.

En el presente trabajo de investigación se ha propuesto desarrollar una técnica de acoplo eficiente basada en inverted taper, dejando para trabajos paralelos y futuros el estudio de técnicas de acoplo vertical con grating coupler.

III. Diseño de la estructura de acoplo basada en inverted taper.

En el siguiente apartado se describe el diseño de la estructura de acoplo propuesta basada en inverted taper. Parte del trabajo de diseño se ha publicado en congresos internacionales así como en revista también internacional, tal y como aparece en los anexos.

III.1. Estructura propuesta.

En la Figura 3.1a se ilustra la estructura propuesta a diseñar basada en inverted taper. La guía monomodo SOI de 500nm de anchura que se desea acoplar con la fibra óptica se termina con el inverted taper. Si se elimina el substrato de la oblea original, se puede utilizar la capa de óxido de la oblea SOI de partida como guía de bajo contraste para facilitar el guiado de la luz a su paso por el inverted taper sin necesidad de depositar sobre el taper otros materiales, como se muestra en la Fig. 3.1a. Por lo tanto, bajo el taper se construye una guía de óxido de $3\mu\text{m}$ de altura con ayuda de esta capa de forma que la estructura queda al aire, tal y como se muestra en la Fig. 3.1a.

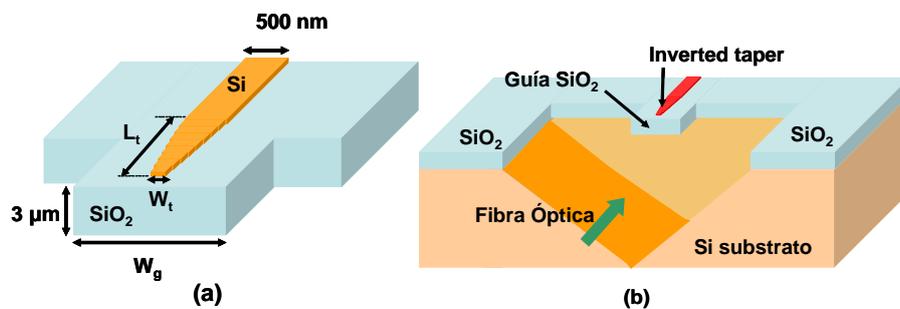


Fig. 3.1. (a) Detalle de la estructura propuesta de acoplo basada en inverted taper. (b) Integración de la estructura de acoplo propuesta con técnicas de auto-alineamiento V-Groove.

Los principales parámetros de diseño de la estructura de acoplo propuesta en la Fig. 3.1a son la longitud del taper (L_t), la anchura de la guía de óxido (W_g) y la anchura del extremo del taper (W_t), como se ilustra en dicha figura. Además, puesto que vamos a eliminar el sustrato de la oblea SOI, es posible integrar de manera conjunta la estructura de la Fig. 3.1a con técnicas de auto-alineamiento como la V-Groove ilustrada en la Fig. 3.1b. Estas técnicas de auto-alineamiento consisten en fabricar una oquedad en la oblea de partida de forma que la fibra óptica encaje perfectamente en dicho hueco practicado en el silicio de la oblea, facilitando así el alineamiento de la fibra con el circuito integrado en cuestión. El conjunto que forman la estructura de acoplo propuesta y la estructura de auto-alineamiento, ilustrado en la Fig. 3.1b, son un primer paso hacia estructuras que faciliten conjuntamente un acoplo eficiente a los chips y un futuro conectorizado y empacotado de los mismos para su comercialización final.

Para el análisis y diseño de la estructura de la Fig. 3.1a, se pensó en un principio en utilizar el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) que se explica en [23]. Sin embargo, al tratarse de una estructura en 3D, se necesitaba gran cantidad de memoria para las simulaciones debido principalmente a las grandes dimensiones de la estructura. Por tanto, se hicieron algunas aproximaciones de la estructura en 2D, con ayuda del método del índice efectivo que se explica en [10]. El trabajo de simulación y análisis de la estructura con ayuda del método del índice efectivo para 2D se muestra en el Anexo 1, cuyo trabajo fue presentado el pasado mes de abril en el congreso internacional ECIO 2007 (European Congress on Integrated Optics 2007) en Copenhague (Dinamarca).

Sin embargo, posteriormente se pensó en un análisis y diseño de la estructura el cual se detalla a continuación y que, como veremos en el capítulo de medidas experimentales, se ajusta perfectamente a los resultados experimentales tras la fabricación. Primeramente se evalúa, mediante la integral de solape de la ecuación (1), las pérdidas de acoplo en el interfaz con la fibra entre los perfiles de los modos fundamentales de la guía de óxido y de la fibra. Así, se escoge un valor para la anchura de la guía de óxido que menores pérdidas de acoplo produzca en dicho interfaz a una longitud de onda de 1550nm. Posteriormente, para el diseño de la anchura del extremo del taper, se realiza el mismo procedimiento, pero evaluando ahora la integral de solape en el interfaz donde se encuentra dicho extremo del taper. Se escoge, así, un valor para la anchura del extremo del taper que menores pérdidas de acoplo produzca en dicho interfaz. Finalmente, con ayuda del método BPM se hace un análisis de la estructura en 3D para escoger finalmente la longitud óptima del taper. Este análisis fue publicado en la revista internacional OPTICS EXPRESS el pasado mes de mayo, cuyo artículo se ilustra en el Anexo 2.

III.2. Diseño del interfaz con la fibra óptica.

Para el diseño de la guía de SiO₂ se evaluó la integral de solape de la ecuación (1) entre los perfiles modales de la guía y de la fibra. Para el modo en la fibra se aplicó la aproximación por un pulso gaussiano explicada en el punto 2. Para la obtención del modo en la guía de SiO₂ se hizo uso de simulaciones con el método BPM, tal y como también se explicaba en el punto 2. En la Fig. 3.2 se muestra el resultado de las pérdidas de acoplo obtenidas con la integral de solape en el interfaz con la fibra a una longitud de onda de 1550nm en función del diámetro de campo modal (MFD) de la fibra para distintos valores de anchura de la guía de SiO₂. Los mismos resultados se obtuvieron tanto para polarización TE y TM, por lo que los resultados ilustrados en la Fig. 3.2 son válidos para ambas polarizaciones. El diseño es, por tanto, insensible a la polarización en el extremo por donde acopla la fibra óptica.

Según los resultados de la Fig. 3.2, vemos cómo para un acoplo a fibra monomodo estándar (MFD=10 μ m), las pérdidas de acoplo disminuyen conforme aumenta la anchura de la guía de SiO₂. Para una anchura de dicha guía de 8 μ m, las pérdidas de acoplo en el interfaz con la fibra son de unos 4.2dB. Para una anchura de la guía de 10 μ m, las pérdidas de acoplo apenas han disminuido unos 0.3dB respecto al valor anterior. Por tanto, y con tal de minimizar el valor de la anchura de la guía, se ha escogido un valor de anchura de 8 μ m para el resto del diseño de la estructura.

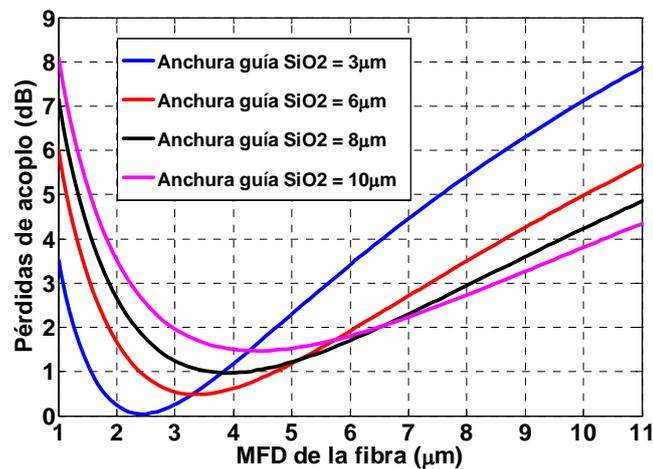


Fig. 3.2. Pérdidas de acoplo en el interfaz con la fibra en función del MFD de la fibra y para distintos valores de la anchura de la guía de SiO₂, a una longitud de onda de 1550nm y para polarizaciones TE y TM.

III.3. Diseño del taper.

Para el diseño del extremo del taper se consideró el interfaz ilustrado en la Fig. 3.3. El proceso de análisis es similar al descrito en la sección anterior. En el extremo del taper, si consideramos el interfaz señalado en la Fig. 3.3a, es posible evaluar la integral de solape entre el modo fundamental de la guía de SiO_2 de $8\mu\text{m}$ de anchura, según la anchura óptima del apartado anterior, con el inverted taper en su superficie y sin él, tal y como se ilustra en la Fig. 3.3b.

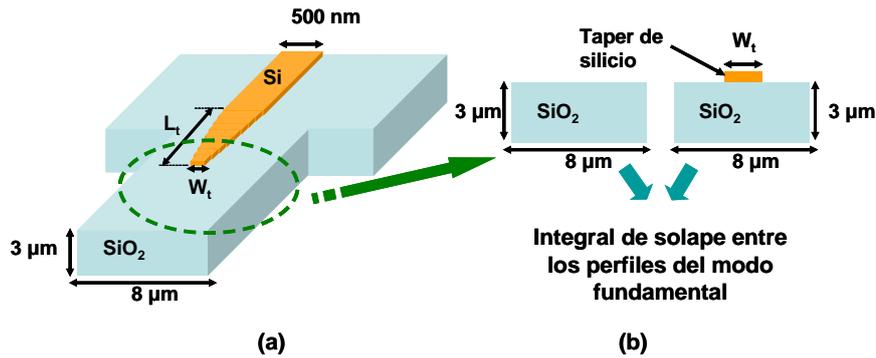


Fig. 3.3. (a) Detalle del interfaz entre la guía de SiO_2 con el inverted taper sobre su superficie. (b) Procedimiento para evaluar las pérdidas en dicho interfaz con la integral de solape.

En la Figura 3.4 se ilustra las pérdidas de acoplo evaluadas con la integral de solape en el interfaz señalado en la Fig. 3.3 en función de la anchura del extremo del taper a una longitud de onda de 1550nm y para polarizaciones TE y TM.

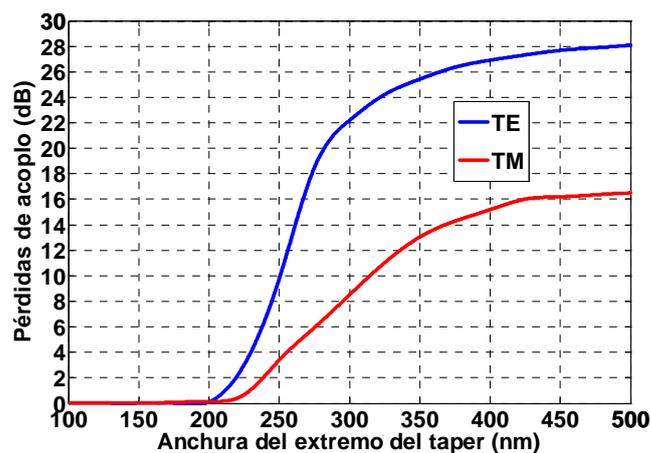


Fig. 3.4. Pérdidas de acoplo en el interfaz de la Fig. 3.3 en función de la anchura del extremo del taper para una longitud de onda de 1550nm y polarizaciones TE y TM.

En la gráfica de la Fig. 3.4 se observa cómo para anchuras del extremo del taper menores a 200nm, las pérdidas de acoplo en dicho interfaz son prácticamente despreciables tanto para polarización TE como para polarización TM. Por otro lado, las pérdidas de acoplo obtenidas en la Fig. 3.4 no cambian significativamente para valores de la anchura del extremo del taper superiores a 400nm. Esto es debido a que para estos valores de anchura, el modo está muy localizado en la guía SOI de alto contraste y únicamente una pequeña parte del modo viaja por la guía de bajo contraste de SiO₂. Por tanto, si tomamos anchuras del extremo del taper menores a 200nm, el diseño es insensible a la polarización también en dicho interfaz, al igual que pasaba en la sección anterior en el interfaz con la fibra. Por este motivo, y con tal de maximizar al máximo dicho valor de anchura para una mayor facilidad en la fabricación de la estructura, se ha escogido un valor de anchura del extremo del taper de 200nm.

Para el diseño de la longitud óptima del taper, se ha propuesto utilizar simulaciones 3D basadas en el método BPM explicado en [12]. Para los parámetros obtenidos anteriormente de anchura del extremo del taper ($W_t=200nm$) y anchura de la guía de SiO₂ ($W_g=8\mu m$), la Fig. 3.5 ilustra el especto de la distribución de campo en un taper de 400 μm de longitud según una simulación 3D con el método BPM.

En la simulación de la Fig. 3.5, la estructura se excita por el modo fundamental de la guía de SiO₂ a una longitud de onda de 1550nm. De esta forma, el interfaz entre la guía de SiO₂ y la fibra no se contempla en la simulación de la Fig. 3.5, por lo que a las pérdidas de acoplo obtenidas según esta simulación habrá que sumarles las pérdidas de acoplo en el interfaz con la fibra obtenidas en la sección 3.2 con tal de obtener las pérdidas de acoplo totales de la estructura. Tras excitar la estructura con el modo fundamental de la guía de SiO₂, la potencia que acopla a la guía monomodo SOI de 500nm de anchura se mide con un monitor de potencia. En la Fig. 3.6 se ilustra las pérdidas de acoplo obtenidas según la simulación de la Fig. 3.5 en función de la longitud del taper a una longitud de onda de 1550nm y para polarizaciones TE y TM.

Según los resultados de la Fig. 3.6 se puede observar cómo las pérdidas de acoplo disminuyen conforme el taper se hace más largo. Esto es debido a que conforme el taper tiene mayor longitud, su perfil es menos pronunciado, y el modo de la guía monomodo tiende más perfectamente al modo en el extremo del taper sin perderse potencia por radiación en la transición. Además, el mismo comportamiento se observa para polarización TE que para polarización TM. Es importante destacar que, para un taper de longitud cero (estructura sin taper), los valores de pérdidas de acoplo estimados con la simulación BPM en la Fig. 3.6 coinciden exactamente con los obtenidos en la Fig. 3.4 con la integral de solape entre la guía de SiO₂ con y sin el taper encima para una anchura del taper de 500nm (equivalente a tener únicamente la guía de 500nm sobre la guía de SiO₂).

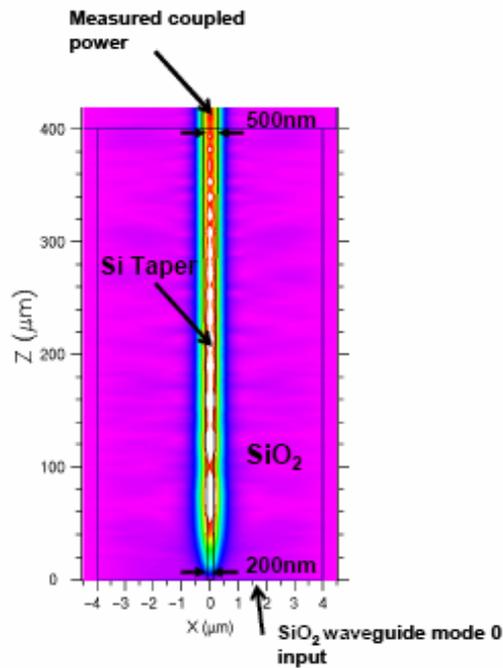


Fig. 3.5. Aspecto de la distribución de campo en un inverted taper de 400µm para la estructura de acoplo propuesta, y para los parámetros de diseño obtenidos en las secciones anteriores.

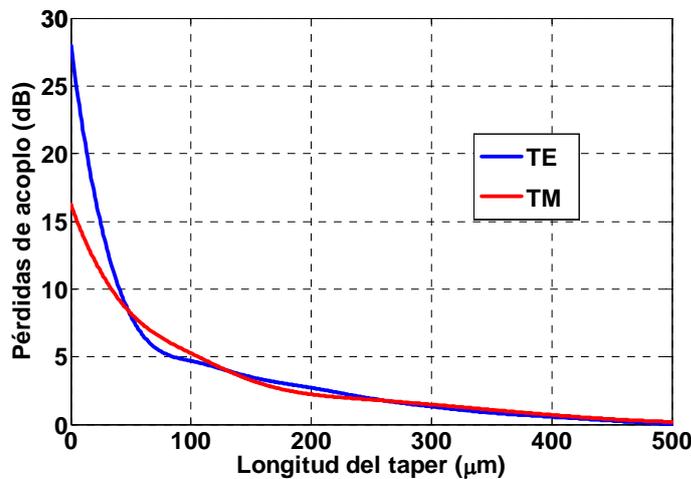


Fig. 3.6. Pérdidas de acoplo en función de la longitud del taper para polarizaciones TE y TM y una longitud de onda de 1550nm.

De acuerdo con los valores de pérdidas de acoplo obtenidos en la Fig. 3.6, para longitudes del taper mayores a 500µm, las pérdidas de acoplo en función de la longitud son nulas. Sin embargo, para un taper de 400µm de longitud, las pérdidas de acoplo obtenidas en la Fig. 3.6 son de alrededor de 0.5dB para polarización TE y de 0.7dB para TM. Por lo que, con un taper de 100µm menos del valor óptimo, las pérdidas de acoplo en función de la longitud son también muy bajas. Por este motivo, y con tal de minimizar al máximo la longitud de la estructura, se ha escogido una longitud del taper de 400µm.

Puesto que la longitud del taper obtenida es bastante grande ($400\mu\text{m}$), puede pensarse que la estructura sea factible de producir problemas de estabilidad mecánicos puesto que se encontraría al aire. Considerando la gráfica de la Fig. 3.7 se ha investigado si parte del taper podría estar metido hacia dentro de la estructura sin colgar en el aire evaluando las pérdidas de acoplo en función del parámetro d de la Fig. 3.7.

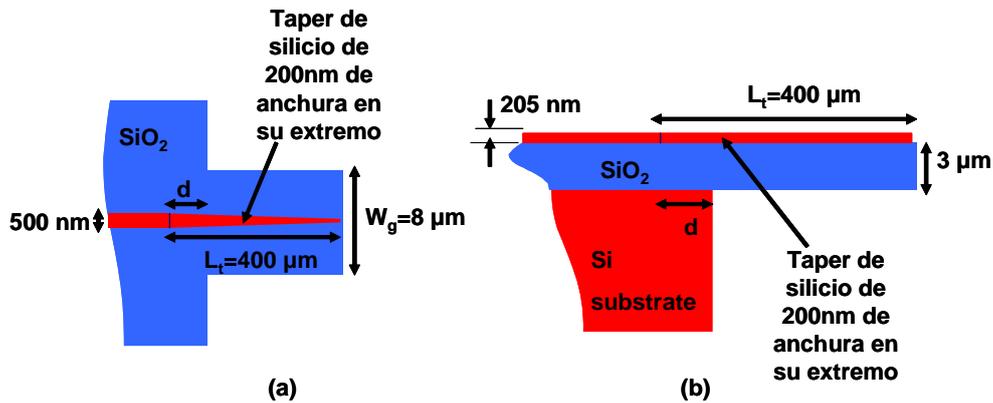


Fig. 3.7. Vista de la parte de arriba (a) y de perfil (b) de la estructura para analizar la influencia del parámetro d sobre las pérdidas de acoplo para poder así que parte de la estructura no esté dispuesta al aire.

En la gráfica de la Fig. 3.8 se muestran los resultados de las pérdidas de acoplo obtenidos para un taper de $400\mu\text{m}$ de longitud en función del parámetro d ilustrado en la Fig. 3.7. De acuerdo con los resultados de la Fig. 3.8, si d es inferior a $325\mu\text{m}$, las pérdidas de acoplo obtenidas anteriormente no varían, por lo que únicamente sería suficiente con que las últimas $75\mu\text{m}$ del taper estuvieran expuestas al aire. De esta forma, la robustez de la estructura frente a posibles problemas de estabilidad mecánica aumentaría considerablemente.

Finalmente, cabe recordar que en las simulaciones en función de la longitud del taper con el método BPM en 3D no se ha tenido en cuenta el interfaz con la fibra óptica, puesto que la estructura se excitaba con el modo fundamental de la guía de SiO_2 . De esta forma, a las pérdidas de acoplo obtenidas con las simulaciones 3D BPM (0.5dB de pérdidas de acoplo para TE y 0.7dB para TM) les tendríamos que sumar las pérdidas de acoplo obtenidas en el apartado 3.2 en el interfaz con la fibra (4.2dB para ambas polarizaciones TE y TM). De esta forma, las pérdidas de acoplo totales de la estructura a una longitud de onda de 1550nm son 4.7dB para polarización TE y 4.9dB para polarización TM.

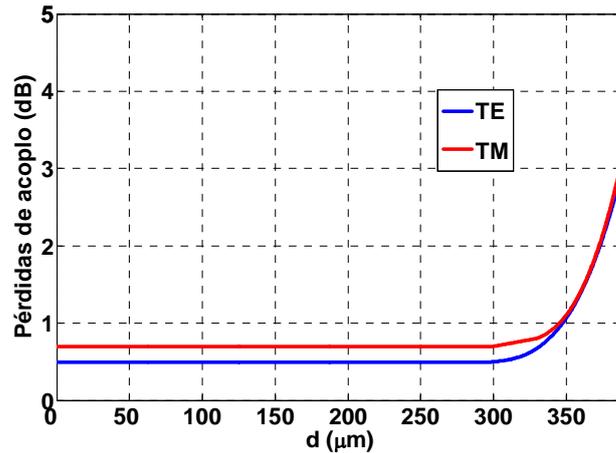


Fig. 3.8. Pérdidas de acoplo en función del parámetro d ilustrado en la Fig. 3.7 para un taper de $400\mu\text{m}$ de largo y para polarizaciones TE y TM a una longitud de onda de 1550nm .

III.4. *Análisis espectral.*

Una vez obtenidos los principales parámetros para un óptimo acoplo a una longitud de 1550nm , se ha hecho un análisis espectral de la estructura en función de la longitud de onda para poder observar el espectro de la estructura diseñada y poder así hacernos una idea de parámetros espectrales de la misma como por ejemplo el ancho de banda.

La Fig. 3.9 muestra la respuesta en frecuencia de las pérdidas de acoplo entre la guía monomodo SOI de 500nm de anchura acoplada a una fibra monomodo estándar de $10\mu\text{m}$ de MFD mediante la estructura de acoplo propuesta según los parámetros óptimos hallados anteriormente (inverted taper de $400\mu\text{m}$ de longitud y 200nm de anchura en su extremo sobre una guía de SiO_2 de $8\mu\text{m}$ de anchura y $3\mu\text{m}$ de altura). Se obtiene una respuesta prácticamente plana en frecuencia debido a que no existen efectos resonantes indeseables ya que el acoplo es eficiente. Además la respuesta es plana en todo el rango de longitudes de onda considerado, por lo que el ancho de banda de la estructura es superior a 100nm . Es importante destacar, que las pérdidas de acoplo obtenidas se pueden reducir empleando fibras de menor MFD, tal y como se desprendería de la Fig. 3.2.

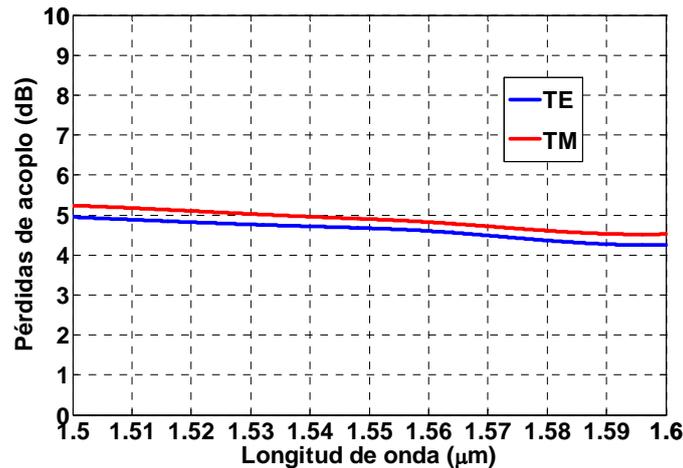


Fig. 3.9. Respuesta en frecuencia de las pérdidas de acoplo entre la guía monomodo de 500nm de anchura y un fibra monomodo estándar de 10μm de MFD por medio de la estructura de acoplo analizada.

IV. Fabricación y medidas.

Desde que el dispositivo es diseñado, simulado y parametrizado hasta que finalmente es caracterizado en el laboratorio, básicamente el proceso completo de cualquier estructura pasa por las siguientes etapas, ilustradas también en la Fig. 4.1:

- **Diseño teórico de la estructura:** En esta etapa se diseña el dispositivo óptico y se simula mediante herramientas de simulación con tal de encontrar los parámetros deseados para el buen funcionamiento del mismo en la aplicación y frecuencia de trabajo deseada. Básicamente se usan herramientas de simulación basadas en los métodos comúnmente usados para la simulación de estructuras ópticas como pueden ser el de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) y el método BPM (Beam Propagation Method). Este primer paso es el desarrollado en el punto 3 para el diseño de la estructura de acoplo propuesta.
- **Proceso tecnológico de nanofabricación:** Una vez obtenidos los parámetros de la estructura simulada por cualquiera de los métodos mencionados se procede al proceso tecnológico mediante el cual se fabrica la estructura tomando como elemento base en nuestro caso una oblea SOI. El proceso de fabricación, debido a su importancia vital en todo el proceso básico, se explicará posteriormente.
- **Inspección y caracterización del dispositivo:** Una vez el dispositivo ha sido fabricado, se procede a la inspección del mismo para proceder a detectar las posibles imperfecciones que hayan podido surgir tras los procesos de fabricación. El cañón de electrones es el elemento encargado de la exposición de los motivos, y es posible con el mismo inspeccionar las

muestras. En este punto es donde se procede a caracterizar el dispositivo en el laboratorio mediante el correspondiente montaje dedicado a ello y comprobar que funciona correctamente con respecto a lo simulado en el paso primero. El montaje para la caracterización de los prototipos fabricados se explicará posteriormente.

- **Conclusiones y retroalimentación:** Después de la inspección y caracterización del motivo diseñado se puede concluir con el mismo si todo ha ido correctamente y como esperábamos o volver a lanzar otro diseño, si hemos detectado errores en el proceso de fabricación, o incluso volver a rediseñar la estructura si se requiere. La realimentación hacia cualquiera de los pasos anteriores es total.

A continuación se explica más detalladamente el proceso tecnológico de fabricación y el montaje experimental para la caracterización de los prototipos fabricados posteriormente.

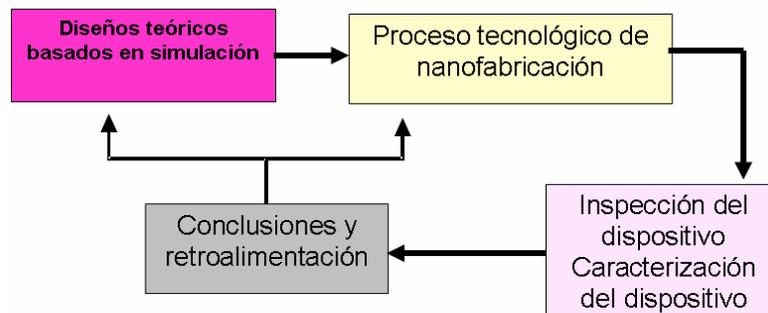


Fig. 4.1. Esquema de los pasos en que se divide el proceso básico de fabricación de estructuras ópticas.

IV.1. *Proceso de fabricación.*

Se entiende por proceso de fabricación el proceso mediante el cual a partir de la oblea SOI de partida, se obtiene físicamente nuestra estructura diseñada previamente. Los prototipos que diseñamos se fabricarán sobre una oblea SOI de 6'' (150mm) como las descritas en anteriores secciones. El proceso tecnológico de fabricación es, a grandes rasgos, el siguiente:

El primer paso es depositar una capa de resina sobre la oblea de partida. El elemento encargado de la distribución de la resina sobre la oblea es el Coater. La funcionalidad del Coater es buscar una relación entre el espesor de la resina con la que cubrir la oblea y la velocidad para cubrirla de la manera más uniforme posible. La Fig. 4.2 muestra una imagen de una oblea sobre la que se depositará la resina y una imagen del Coater.

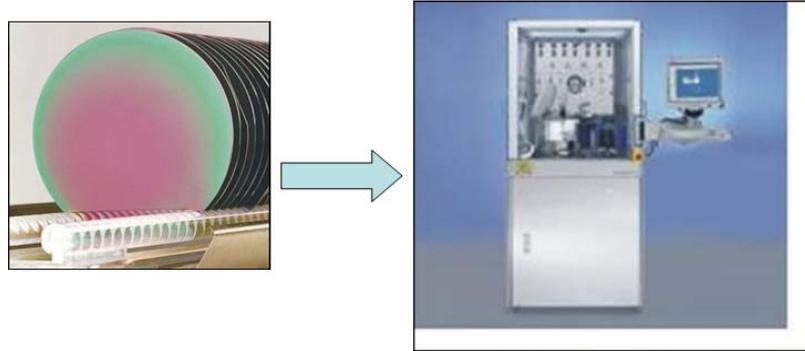


Fig. 4.2. Detalle de una oblea sobre la que se depositará la resina y del Coater.

Las estructuras que desean fabricarse se exponen sobre dicha capa de resina mediante litografía de haz de electrones (EBL, E-Beam Lithography). Este tipo de litografía permite obtener resoluciones de hasta 2nm. El elemento encargado de la exposición es el cañón de electrones. El cañón de electrones permite grabar motivos sobre resinas especiales que cambian sus propiedades al recibir electrones. El dispositivo comercial usado para la litografía EBL es el Raith 150. La Fig. 4.3 muestra una imagen del cañón de electrones Raith.



Fig. 4.3. Detalle del cañón de electrones para la exposición de las muestras.

La técnica de barrido electrónico (SEM, Scanning Electron Microscope) permite inspeccionar las muestras expuestas. Esta técnica está basada en el bombardeo de las muestras con electrones y tiene detectores que recogen los electrones rebotados para formar la imagen de la muestra aumentada.

A continuación se revela la capa de resina, normalmente mediante ataques químicos, obteniéndose la máscara que permite transferir los diseños a la capa de silicio de la oblea mediante ataque inductivo de plasma (ICP, Inductive Coupled Plasma). El ICP permite pasar el motivo en la resina al sustrato. Para ello crea un plasma de gases fluorados que atacan el silicio o el óxido de

silicio, tanto mediante procesos físicos (sputtering) como químicos (recombinación). La Fig. 4.4 muestra una imagen del dispositivo encargado del ICP.



Fig. 4.4. Detalle del dispositivo encargado del ataque inductivo de plasma ICP.

El último paso será la limpieza de los restos de resina que quedan sobre la oblea.

Para la creación de la máscara se pueden utilizar dos tipos de resina:

- **Resina positiva:** En este tipo de resinas se debe exponer, mediante el proceso de litografía, las zonas de la oblea en las que se quiere atacar el silicio. Es lo que se denomina diseño inverso ya que, por ejemplo, para fabricar una guía no hay que exponer la guía, sino dos franjas a ambos lados de la guía, denominadas trincheras, para así formar la guía original. El proceso de fabricación se muestra en la parte superior de la Fig. 4.5. Un ejemplo de guía fabricada siguiendo este proceso se muestra en la Fig. 4.6a, donde se ilustra una imagen de barrido electrónico (SEM) de una guía donde se puede observar tanto la guía como las trincheras a ambos lados de la misma.
- **Resina negativa:** En este tipo de resinas será la parte no expuesta la que será eliminada cuando se realice el revelado, por lo que únicamente habrá que exponer las regiones de la oblea en las que no se atacará el silicio. Es lo que se denomina proceso directo ya que en este caso, siguiendo el ejemplo anterior, únicamente hay que exponer la guía. El proceso de fabricación se muestra en la parte central de la Fig. 4.5. Mediante el uso de resina negativa se consigue una menor rugosidad en las paredes de las guías, como se muestra en la Fig. 4.7, donde puede observarse una guía fabricada con resina positiva (Fig. 4.7a) y una guía fabricada con resina negativa (Fig. 4.7b).

El diseño directo es preferible ya que permite reducir los tiempos de exposición del proceso de litografía. Existe otra alternativa para conseguir un diseño directo utilizando una resina positiva:

- Resina positiva + máscara de metal:** En este caso se siguen los mismos pasos descritos anteriormente para la resina positiva. Una vez obtenemos la máscara de resina después del revelado se deposita una máscara de metal haciendo uso de una técnica de evaporación (VPE – Vapor Phase Epitaxy). De esta forma, al eliminar la resina se obtendrá una máscara de metal directamente sobre las zonas de la oblea en las que no se quiere atacar el silicio (proceso conocido como lift-off). El proceso se muestra en la parte inferior de la Fig. 4.5. Este proceso permite una mayor verticalidad de las paredes pero sin embargo resulta más complejo. Un ejemplo de guía fabricada siguiendo este proceso se muestra en la imagen SEM de la Fig. 4.6b.

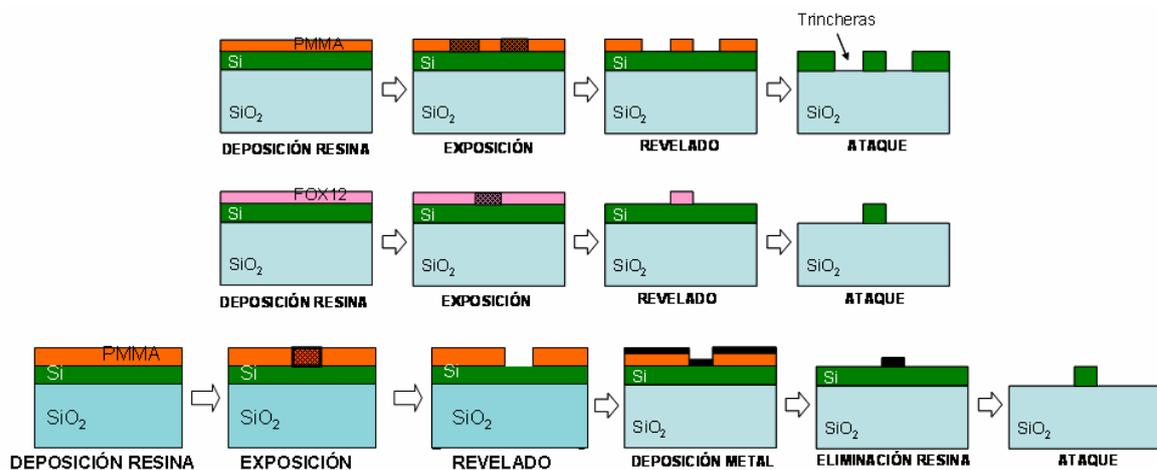


Fig. 4.5. Distintos procesos de fabricación basados en: resina positiva (arriba), resina negativa (centro) y resina positiva más una capa de metal ó lift-off (abajo).

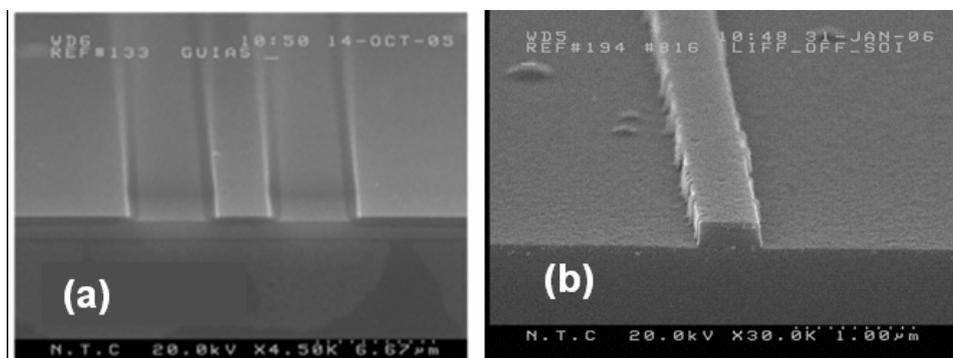


Fig. 4.6. Imágenes de barrido electrónico (SEM) de estructuras fabricadas mediante (a) resina positiva y (b) resina positiva más máscara de metal.

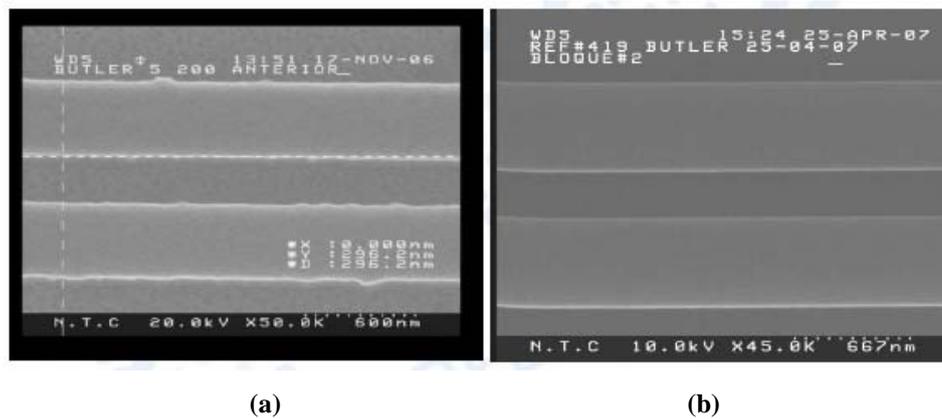


Fig. 4.7. Imágenes de guías fabricadas mediante (a) resina positiva y (b) resina negativa, donde puede observarse una menor rugosidad empleando resina negativa.

Inicialmente los procesos que se seguían en el centro para la fabricación de las muestras se basaban en la obtención de la máscara con resina positiva (Fig. 4.5 arriba). Posteriormente se pasó a utilizar el proceso lift-off (Fig. 4.5 abajo) debido a que se conseguían mejores acabados en los diseños y mayor verticalidad en las paredes de las guías de las estructuras. Actualmente se están realizando grandes esfuerzos en orientar la fabricación hacia el proceso con resina negativa ó proceso directo (Fig. 4.5 central). Con esta técnica es posible reducir considerablemente los tiempos de exposición, y por tanto los diseños se fabrican más rápidamente. Además se consigue una menor rugosidad, como se puede comprobar en la Fig. 4.7. Un primer prototipo de la estructura de acoplo diseñada se fabricó siguiendo el proceso de fabricación lift-off. En la actualidad se está orientando el proceso de fabricación basado en resina negativa y se están poniendo grandes esfuerzos en optimizar los distintos pasos involucrados en la fabricación, ya que la idea es utilizar posteriormente en un futuro este proceso. Posteriormente se analizará en detalle los pasos seguidos en la fabricación de los prototipos, así como medidas experimentales de los mismos. Antes, se explica a continuación el montaje experimental utilizado para la medida óptica de dichos prototipos.

IV.2. Montaje experimental para la caracterización.

En la Fig. 4.8 se ilustra un diagrama de bloques del montaje realizado para la caracterización de la estructura de acoplo diseñada.

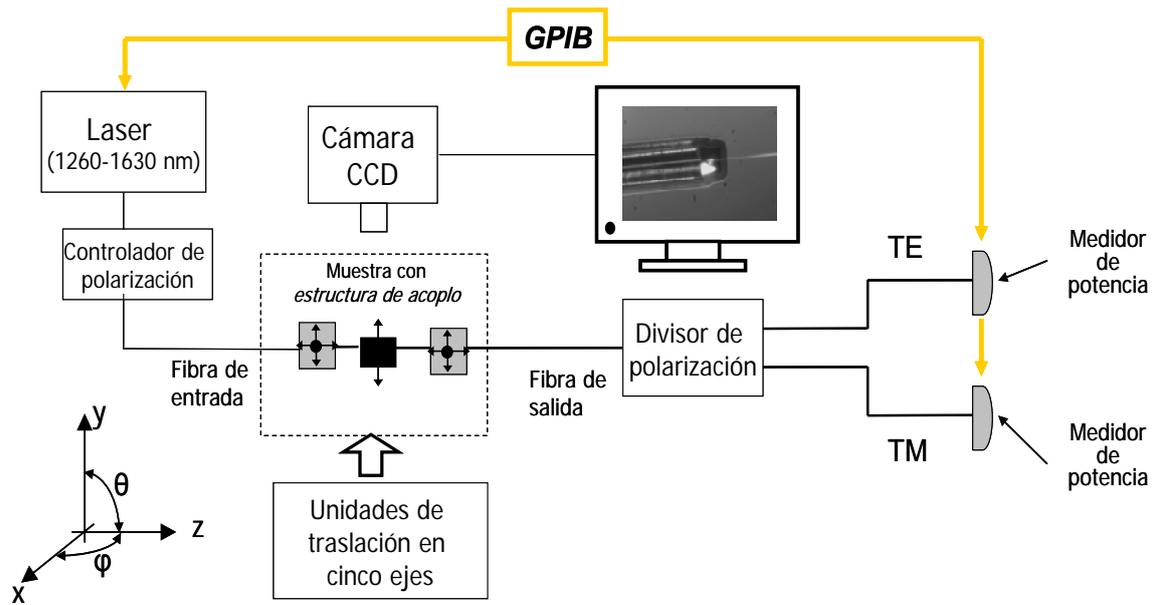


Fig. 4.8. Diagrama de bloques del montaje realizado para la medida óptica.

Como fuente de excitación se utiliza un láser de banda ancha SANTEC TSL-210F que contiene en su interior cuatro cavidades que cubren en total un rango de longitudes de onda comprendido entre 1260nm-1630nm. Tras el láser se coloca un controlador de polarización que conecta con la fibra de entrada encargada de alimentar la muestra que contiene una estructura de acoplo a la entrada y otra a la salida. A la salida del circuito integrado se coloca la fibra de salida, la cual se conecta a un divisor de polarización que se encarga de dividir la luz de salida en sus dos polarizaciones ortogonales TE y TM. A las dos salidas del divisor de polarización se conecta un medidor de potencia ANDO Q2140. Puesto que la polarización a la salida del láser es arbitraria, es necesario el controlador de polarización a la entrada del circuito integrado, de manera que para realizar una medida en una polarización (por ejemplo polarización TE) dicho controlador de polarización se irá variando hasta que en el medidor de potencia de la salida se obtenga un máximo de potencia para dicha polarización. Las fibras tanto de entrada como de salida son fibras monomodo estándar del tipo SMF-28, cuyo MFD es de $10\mu\text{m}$. Tanto el láser como el medidor de potencia se controlan desde el PC mediante un controlador del bus GPIB. Para facilitar el alineamiento, las fibras de entrada y salida se encuentran dispuestas sobre unas unidades de traslación con control en cinco ejes (x, y, z, θ, φ) y precisiones de hasta 20nm. El circuito integrado se encuentra también dispuesto sobre una unidad de traslación mediante la cual se puede controlar su posición en altura (eje y) y su posición según el eje z (ver Fig. 4.8). Debido a las pequeñas dimensiones de los circuitos integrados, el alineamiento entre el dispositivo y la fibra óptica es muy importante. La Fig. 4.9 ilustra una muestra de SOI al lado de una moneda de 2 céntimos de Euro donde puede apreciarse el pequeño tamaño de dicha muestra.

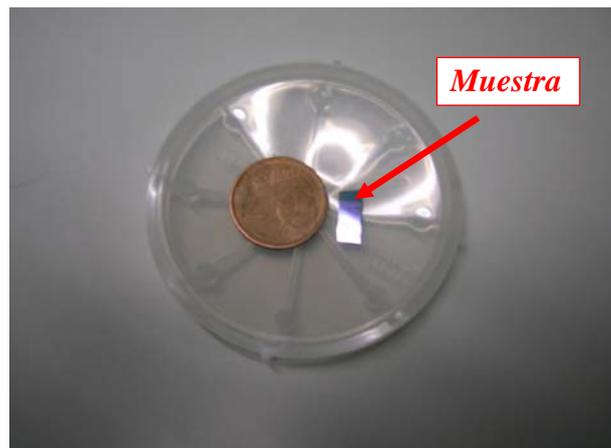


Fig. 4.9. Aspecto de una muestra de un circuito integrado SOI.

El alineamiento entre las fibras de entrada y salida y la muestra se puede observar en el monitor del PC con una cámara CCD dispuesta sobre el propio montaje a la que se ha acoplado un conjunto de lentes de gran aumento.

En la Fig. 4.10 se muestra una imagen real del montaje experimental, así como en la Fig. 4.11 se ilustra un detalle de las unidades de traslación de las fibras y la muestra del montaje, así como otro detalle del divisor de polarización de salida y de los medidores de potencia. Se ilustra también en la Fig. 4.12 el láser y el controlador del medidor de potencia utilizados, y controlados mediante el PC con GPIB.

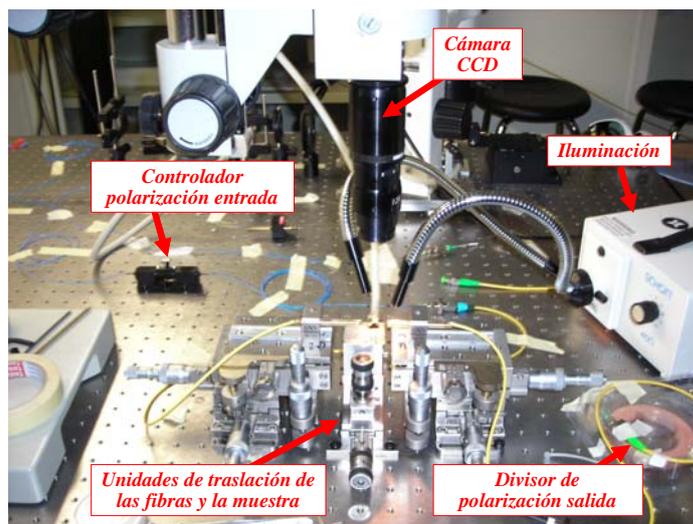


Fig. 4.10. Imagen real del montaje realizado para la caracterización óptica.

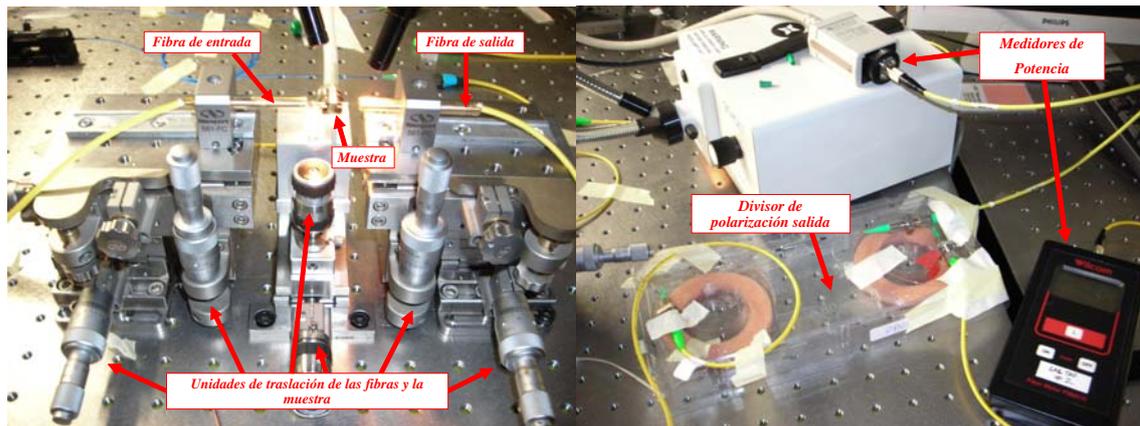


Fig. 4.11. Detalles del montaje de las unidades de traslación de las fibras y la muestra y del controlador de polarización y los medidores de potencia a la salida.

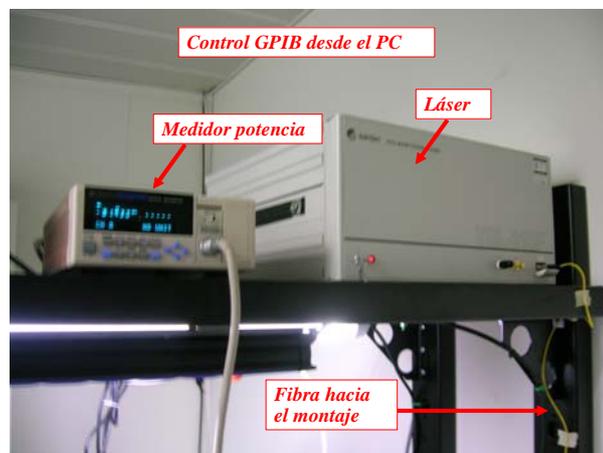


Fig. 4.12. Detalle del láser y del medidor de potencia utilizados en el montaje y que son controlados desde el PC con GPIB.

IV.3. Fabricación y medidas del prototipo fabricado.

En la Fig. 4.13 se ilustran los pasos seguidos en la fabricación de la estructura de acoplo. Se parte de la oblea SOI comercial de 6'', con las dimensiones ya conocidas (205nm de altura de la capa de Si, 3 μ m de la altura de la capa de SiO₂, y 750 μ m de altura del substrato, también de Si). El siguiente paso (paso 2 en la Fig. 4.12) es crear la guía monomodo de 500nm de anchura terminada con el inverted taper mediante litografía por haz de electrones (e-beam) y ataque inductivo de plasma (ICP) sobre el silicio. También se fabrican unas marcas de alineamiento para en el paso siguiente alinear la guía de óxido y la V-Groove con la guía SOI y el taper. En este paso se puede seguir para la obtención de la máscara para la guía y el taper cualquiera de los tres procesos comentados en el apartado de proceso de fabricación (resina positiva, resina negativa ó resina positiva más máscara de metal ó lift-off).

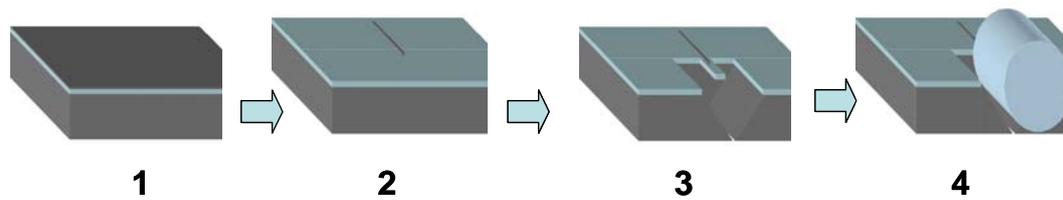


Fig. 4.13. Detalle de los pasos seguidos en la fabricación de la estructura de acoplo estudiada.

Una vez fabricadas la guía y el taper, el siguiente paso (paso 3, Fig. 4.13) es fabricar la guía de óxido que acoplará con la fibra, y la V-Groove sobre la que descansará la fibra. El proceso seguido en este paso es el mismo, tanto si en el paso anterior hemos seguido el proceso de resina negativa, resina positiva ó lift-off. Básicamente este paso consiste en lo siguiente: primeramente se protege la guía y el taper cubriendo toda la superficie con metal escogiendo una técnica que ofrezca un buen recubrimiento y gran adhesión. Seguidamente se cubre dicha capa de metal con otra capa de resina positiva. A continuación se expone la resina con litografía E-beam. Mediante las marcas de alineamiento anteriormente realizadas se alinean la guía y el taper con el dibujo de la V-Groove en la exposición. Tras el revelado, se elimina el metal expuesto mediante ataques químicos. Se atacan las $3\mu\text{m}$ de óxido que ha quedado expuesto tras el ataque químico en el ICP, con un ataque de plasma que de la mayor verticalidad posible, formando así la guía de SiO_2 . Tras el ataque del óxido, se ataca el substrato de silicio expuesto en ICP, mediante un ataque profundo de plasma del silicio, hasta las $63\mu\text{m}$ de profundidad (la mitad del diámetro de la cubierta de la fibra, que es de unas $125\mu\text{m}$) para formar ahora la V-Groove sobre la que descansará la cubierta de la fibra. Finalmente se elimina el metal remanente que haya quedado en la superficie tras los ataques de óxido y de silicio.

Una vez tenemos la estructura fabricada, ya se puede colocar la fibra sobre la V-Groove para caracterizarla en el laboratorio, tal y como se muestra en el paso 4 de la Fig. 4.13. En la Fig. 4.14 se ilustra a escala el aspecto final de la estructura de acoplo junto con la fibra óptica dispuesta sobre la V-Groove.

Un primer prototipo de la estructura de acoplo fue fabricado siguiendo el proceso lift-off para la fabricación de la guía y el taper, explicado anteriormente. Como primera aproximación se fabricó la estructura de acoplo con un taper de $50\mu\text{m}$ de longitud. Para un taper de $50\mu\text{m}$ de longitud, las pérdidas de acoplo estimadas teóricamente son, atendiendo a los resultados teóricos de las Fig. 3.2 y 3.6, alrededor de 12dB para ambas polarizaciones TE y TM.

Primeramente se probó un prototipo con la longitud del taper menor a la óptima para comprobar el buen funcionamiento de la estructura de acoplo y para comprobar también la estabilidad

mecánica de la estructura. En la Fig. 4.15 se ilustra una imagen de la estructura fabricada tomada con el microscopio óptico, así como en la Fig. 4.16 se ilustran dos imágenes de la estructura de acoplo fabricada con un taper de 50 μm de longitud tomadas con el microscopio de barrido electrónico (SEM).

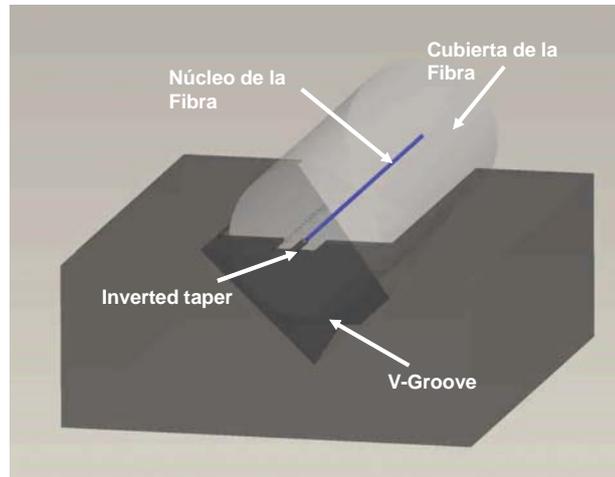


Fig. 4.14. Ilustración a escala del aspecto de la estructura de acoplo junto con la fibra óptica.

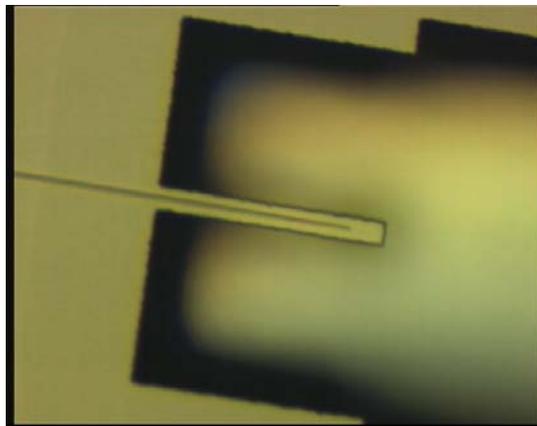


Fig. 4.15. Imagen tomada con microscopio óptico del prototipo de la estructura de acoplo fabricada con un taper de 50 μm de longitud.

En las imágenes de la Fig. 4.16 puede verse cómo existe algo de rugosidad en la estructura debida principalmente a los procesos de ataque químico durante la fabricación, la cual intentará mejorarse en los futuros prototipos optimizando al máximo los procesos de fabricación seguidos.

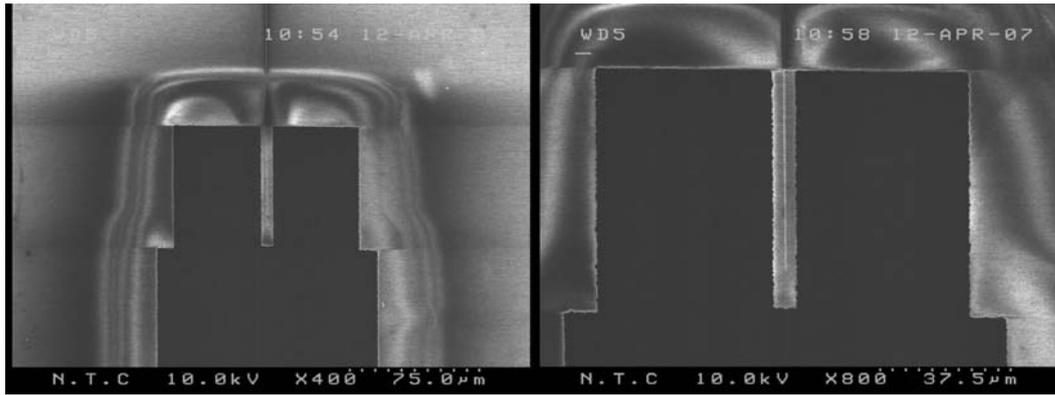


Fig. 4.16. Imágenes tomadas con microscopio de barrido electrónico (SEM) del prototipo de la estructura de acoplo fabricada.

Actualmente se están realizando grandes esfuerzos en orientar los procesos de fabricación hacia el proceso basado en resina negativa para los futuros prototipos a fabricar de la estructura de acoplo diseñada. Este proceso permitirá en gran parte eliminar la rugosidad existente en la estructura ilustrada en la Fig. 4.16.

En la imagen de la Fig. 4.17 se ilustra una fotografía tomada con la cámara CCD del montaje realizado para la caracterización de los prototipos, e ilustrado en la Fig. 4.10, donde puede observarse la fibra óptica introducida en la V-Groove y acoplada a la guía de SiO₂ con el inverted taper en el momento en que la muestra con el taper de 50μm de longitud está siendo caracterizada.

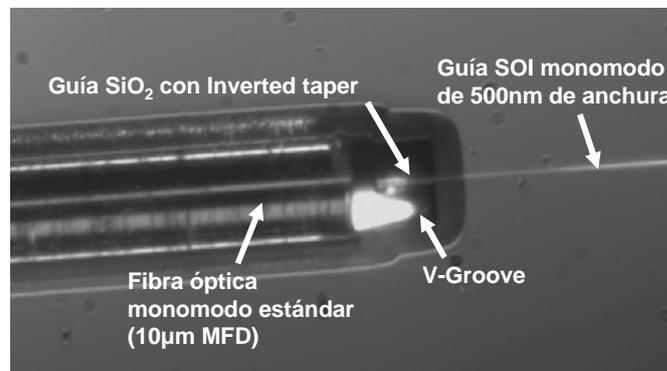


Fig. 4.17. Imagen tomada con la cámara CCD del montaje ilustrado en la Fig. 4.9, donde se observa la estructura de acoplo fabricada y la fibra óptica en el momento de su caracterización.

En la Fig. 4.18 se muestran las medidas experimentales obtenidas de las pérdidas de acoplo del prototipo fabricado en función de la longitud de onda. Asimismo, se ilustran las pérdidas de acoplo teóricas en la misma gráfica. Puede verse cómo existe un gran parecido entre las pérdidas de acoplo experimentales y teóricas. Además, la respuesta obtenida de las pérdidas de acoplo es prácticamente plana en función de la longitud de onda, lo que significa que la estructura de acoplo

se comporta de una manera muy eficiente, y no existe ningún efecto resonante ni reflexiones abruptas indeseadas.

Puesto que el prototipo fabricado posee una longitud del taper menor a la óptima obtenida en el diseño, las pérdidas de acoplo obtenidas son relativamente altas. Posteriormente se fabricarán prototipos de la estructura de acoplo con la longitud óptima del taper obtenida en el diseño con tal de disminuir las pérdidas de acoplo. Asimismo, se intentará buscar algún tipo de mejora a incluir en la técnica de acoplo analizada con el objetivo de reducir aún más las pérdidas de acoplo obtenidas teóricamente para los parámetros óptimos de diseño. Como primera aproximación, las pérdidas de acoplo pueden reducirse empleando fibras de menor MFD que las fibras monomodo estándar empleadas en las medidas, como se desprendería de la Fig. 3.2.

Los resultados experimentales obtenidos han sido aceptados para ser presentados en el congreso internacional GROUP IV PHOTONICS 2007 (GFP2007), que tendrá lugar el 19 de Septiembre de 2007 en Tokio (Japón), y cuyo artículo se incluye en el Anexo 3.

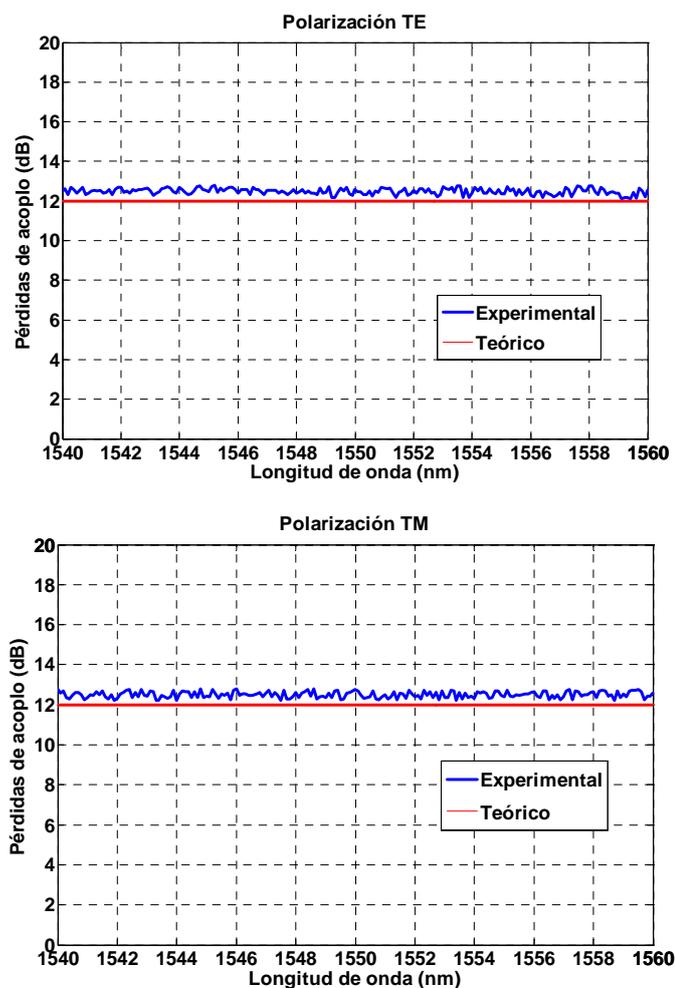


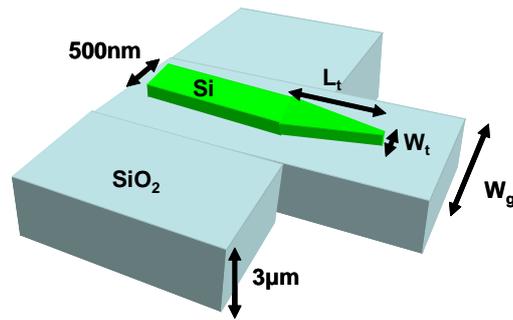
Fig. 4.18. Medidas experimentales y teóricas obtenidas del prototipo fabricado de la estructura de acoplo con un inverted taper de $50\mu\text{m}$ de longitud para ambas polarizaciones TE y TM.

V. Conclusiones.

El propósito fundamental de este proyecto ha sido el análisis, modelado y caracterización de una técnica de acoplo eficiente entre fibra óptica y circuitos integrados ópticos de silicio. Se ha escogido la tecnología fotónica de silicio SOI (presentada en el punto 2), ya que es posible tanto conseguir dispositivos compactos de reducidas dimensiones como utilizar obleas SOI comerciales que son compatibles con los procesos de fabricación en microelectrónica CMOS. El acoplo entre fibra óptica y circuitos integrados ópticos de estas características se realiza por medio de guías. Un acoplo directo entre una fibra monomodo estándar y una guía SOI proporciona, como se muestra en el punto 2.1, unas pérdidas de acoplo muy elevadas. Se puede emplear para el acoplo otro tipo de fibras de núcleo más reducido como son las lensed fiber para reducir tales pérdidas de acoplo. Con el empleo de este tipo de fibras, sin embargo, además de ser mucho más caras que una fibra monomodo estándar, no se soluciona el problema de las resonancias Fabry-Perot inherente a toda guía ineficientemente acoplada, y explicado en el punto 2.2.

Se ha propuesto, entonces, en el punto 2.3 el uso de técnicas eficientes de acoplo en el interfaz con la fibra óptica. Básicamente se han presentado dos de dichas técnicas, una basada en acoplo vertical (gating coupler) y otra basada en acoplo horizontal (inverted taper). Ambas técnicas de acoplo poseen sus ventajas e inconvenientes, tal y como se explicaba en el punto 2.3, por lo que a priori, ambas técnicas de acoplo son factibles para el acoplo. De estas dos técnicas de acoplo, en el presente trabajo se ha propuesto diseñar e implementar una técnica de acoplo basada en inverted taper. En el punto 3 se ha presentado la estructura de acoplo propuesta basada en inverted taper. Se ha propuesto una estructura de acoplo basada en mínima complejidad tecnológica, al no necesitar guía de bajo contraste adicional a depositar sobre el taper, y que además es fácilmente integrable con estructuras V-Groove para facilitar el alineamiento con la fibra, tal y como se explica en el punto 3.1.

Dicha estructura se ha analizado de forma modular, analizando por separado el comportamiento del interfaz con la fibra (punto 3.2), y el extremo y la longitud del taper (punto 3.3). Se han encontrado los principales parámetros de diseño de la estructura que mejor acoplo resulta a fibras monomodo estándar. Los parámetros óptimos de diseño encontrados según esta configuración se muestran en la Fig. 5.1, así como los valores de pérdidas de acoplo a fibras monomodo estándar (SMF-28) de $10\mu\text{m}$ de MFD estimados.



Parámetros @ $\lambda=1550\text{nm}$, polarizaciones TE y TM, fibras monomodo estándar SMF-28 (MFD=10 μm)			
L_t	W_t	W_g	Pérdidas acoplo
400 μm (TE)	200nm (TE)	8 μm (TE)	4.7dB (TE)
400 μm (TM)	200nm (TM)	8 μm (TM)	4.9dB (TM)

Fig. 5.1. Estructura de acoplo diseñada y parámetros óptimos obtenidos.

Una vez analizada la estructura, se procede a su fabricación y caracterización. Básicamente se ha fabricado un prototipo de dicha estructura siguiendo los dos procesos de fabricación introducidos en el punto 4.1. El prototipo fabricado no corresponde a los parámetros óptimos ilustrados en la Fig. 5.1. Puesto que se trata de un primer prototipo, se ha escogido una longitud del taper de 50 μm , menor a la óptima ilustrada en la Fig. 5.1, para empezar a optimizar los procesos de fabricación involucrados. Las pérdidas de acoplo obtenidas teóricamente para un taper de 50 μm de longitud son de alrededor de 12dB tanto para polarización TE como TM. Posteriormente se fabricarán prototipos de la estructura de acoplo atendiendo a la longitud óptima del taper de la Fig. 5.1. Para la caracterización experimental se ha realizado un montaje explicado en el punto 4.2. Utilizando dicho montaje, se han reportado medidas experimentales del prototipo fabricado con un taper de 50 μm de longitud. Se ha obtenido una muy buena correlación entre los resultados teóricos y los resultados experimentales. También se incluyen fotografías tomadas con microscopio óptico y microscopio electrónico (SEM) del prototipo fabricado.

VI. Trabajo futuro.

Actualmente se están optimizando los procesos de fabricación de la estructura diseñada con tal de poder fabricar un prototipo de la misma con los parámetros óptimos de diseño ilustrados en la Fig. 5.1 siguiendo el proceso basado en resina negativa. Además, se está pensando en cubrir posteriormente la estructura con algún material de índice de refracción ligeramente inferior al índice de refracción del óxido con tal de conseguir en el interfaz con la fibra una guía de menor

contraste y cuyo modo fundamental sea de mayores dimensiones, disminuyendo así las pérdidas de acoplo introducidas en el interfaz con la fibra óptica. Dicho procedimiento se ilustra en la Fig. 6.1. En dicha figura, un color más oscuro representa un material con mayor índice de refracción. Si se cubre la guía de SiO₂ con un material de índice de refracción mayor al del aire ($n=1$), pero ligeramente inferior al del óxido ($n=1.46$), el contraste entre índices entre la guía de óxido y el material que le rodea es menor, y por tanto el modo fundamental en dicho interfaz estará más ensanchado y las colas del mismo viajarán por la cubierta, por lo que el acoplo a fibra óptica será más eficiente. Además, el índice efectivo del mismo será mayor y también mejorará la reflexión en el interfaz con la fibra.

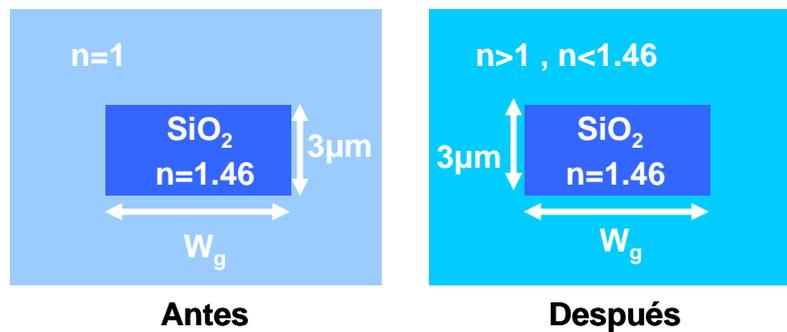


Fig. 6.1. Interfaz con la fibra antes y después de cubrir la guía de SiO₂ con un material de índice de refracción superior al del aire ($n=1$) y ligeramente inferior al índice de refracción del óxido ($n=1.46$). Un color más intenso representa un material de índice de refracción mayor.

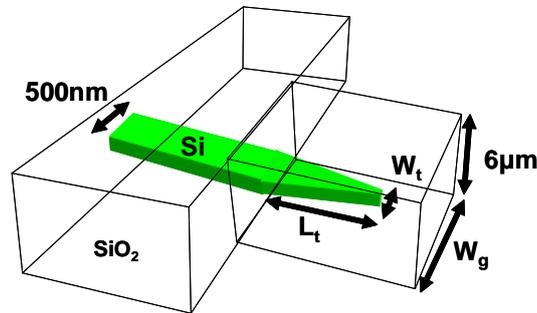
Esta solución se está pensando para, una vez se tenga los procesos de fabricación optimizados, fabricar un prototipo con las dimensiones óptimas de diseño y hacer las medidas del mismo antes y después de cubrir con dicho material, para observar las mejoras en las pérdidas de acoplo.

Otra solución en la que se está pensando es en cubrir inicialmente la oblea con una capa superior de óxido de $3\mu\text{m}$. De esta forma, en el interfaz con la fibra, se dispone de un espesor de $6\mu\text{m}$ (las $3\mu\text{m}$ de óxido de debajo de la oblea original, más las $3\mu\text{m}$ depositadas encima) sobre la que se puede fabricar ahora una guía de óxido de $6\mu\text{m}$ de altura de mayores dimensiones que acople más eficientemente con la fibra óptica.

Siguiendo un proceso de diseño similar al seguido con la estructura de acoplo diseñada en este trabajo, se han estimado, como primera aproximación, unas pérdidas de acoplo de aproximadamente 1.7dB para polarización TE. En la Fig. 6.2 se ilustra el aspecto de esta técnica de acoplo, así como los parámetros óptimos de diseño obtenidos según esta solución.

Pese a poderse conseguir pérdidas de acoplo muy inferiores a las obtenidas con la estructura de acoplo diseñada anteriormente, la estructura de acoplo ilustrada en la Fig. 6.2 presenta el problema

de ser sensible a la polarización. Por lo tanto, un diseño que consigue pérdidas de acoplo mínimas para polarización TE no se corresponde con el diseño óptimo para polarización TM.



Parámetros @ $\lambda=1550\text{nm}$, polarización TE, fibras monomodo estándar SMF-28 (MFD= $10\mu\text{m}$)			
L_t	W_t	W_g	Pérdidas acoplo
$200\mu\text{m}$	120nm	$10\mu\text{m}$	1.7dB

Fig. 6.2. Estructura de acoplo pensada para un futuro y parámetros óptimos obtenidos hasta el momento.

Además de seguir investigando en futuras mejoras para estructuras de acoplo basadas en inverted taper, también se investigarán otras estructuras de acoplo basadas en otras técnicas, como pueden ser técnicas de acoplo vertical basadas en grating couplers, explicadas brevemente en el punto 2.3.

VII. Apéndice: Publicaciones.

VII.1. Publicaciones en revista internacional.

1. J. V. Galán, P. Sanchis, G. Sánchez, and J. Martí, “Polarization insensitive low-loss coupling technique between SOI waveguides and high mode field diameter single-mode fibers”, *Optics Express*, vol. 15, n° 11, 7058-7065, 2007.

VII.2. Publicaciones en congreso internacional.

2. J. V. Galán, P. Sanchis and J. Martí, “Low-loss coupling technique between SOI waveguides and standard single-mode fibers”, *European Congress on Integrated Optics (ECIO)*, April 2007, Copenhaguen (Denmark).
3. J. V. Galán, P. Sanchis, B. Sánchez and J. Martí, “Polarization insensitive fiber to SOI waveguide experimental coupling technique integrated with a V-Groove structure”, *International Conference on Group IV Photonics*, September 2007, Tokyo (Japan).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la ayuda del Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) dentro de su área de investigación de dispositivos fotónicos. El NTC ha sido creado con fines de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+I) en el campo de las tecnologías ópticas avanzadas y sistemas fotónicos para las telecomunicaciones.

El presente trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de financiación de la Unión Europea dentro del proyecto PHOLOGIC y del Ministerio de Educación y Ciencia mediante el proyecto SILPHONICS. Asimismo, se agradece el soporte de financiación de la Generalitat Valenciana en el proyecto “Desarrollo de sistemas de acoplamiento eficiente entre dispositivos nanofotónicos de silicio y fibra óptica”, con referencia 20070775 EFIDIS.

También me gustaría aprovechar dar las gracias a Pablo, por su gran ayuda y apoyo como director de este trabajo. Gracias también a Javier Martí, director del NTC, por darme la oportunidad de disfrutar del NTC. Dar las gracias a todo el equipo de fabricación en especial a Guillermo, Amadeo, Jose, Juan y muy especialmente a Benito y a sus explicaciones y aclaraciones sobre los procesos de fabricación. Dar también las gracias a mis compañeros Antoine, Carlos, Rubén O., Rubén A., Rubén S., Belén y Guillermo, a los que les deseo mucha suerte en su futuro profesional.

Finalmente, me gustaría también dedicar este trabajo a mis padres y hermana.

A todos, gracias.

Valencia, Septiembre 2007.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Special Issue on Optical Networks, IEEE J. Lightwave Technol., vol. 23, issue 10, 2005.
- [2] G. T. Reed, “Device physics: The optical age of silicon”, Nature, vol. 427, pp. 595-596, 2004.
- [3] <http://www.intel.com/technology/silicon/sp/#1>
- [4] http://domino.research.ibm.com/comm/research_projects.nsf/pages/photronics.index.html
- [5] H. Rong, “An all-silicon Raman laser”. Nature, vol. 433, pp. 292–294, 2005.
- [6] L. Pavesi, “Will silicon be the photonic material of the third millenium?”, Journal of Physics: Condensed Matter 15 (2003) R1169-R1196.
- [7] Tai Tsuchizawa et al, “Microphotronics Devices Based on Silicon Microfabrication Technology”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 11, n° 1, 2005.
- [8] Bahram Jalali and Sasan Fathpour, “Silicon Photonics”, Journal of Lightwave Technology, vol. 24, n° 12, 2006.
- [9] Bahram Jalai, Mario Paniccia, and Graham Reed, “Silicon Photonics”, IEEE Microwave Magazine, 2006.
- [10] Graham T. Reed , Andrew P. Knights, “Silicon Photonics, an introduction”, John Wiley & Sons. Ltd.
- [11] Dirk Taillaert, “Grating couplers as Interface between Optical Fibres and Nanophotonic Waveguides”, Ph. D. Thesis, Univesity of Ghent, 2005.
- [12] RSOFTE Design Group, “BeamPROP: User Guide”, reference manual, 2005.
- [13] J. Capmany, F. J. Fraile-Peláez y J. Martí, “Fundamentos de Comunicaciones Ópticas”, Ed. Síntesis, 1998.
- [14] D. Taillaert, W. Boagerts and R. Baets, “Efficient coupling between submicron SOI-waveguides and single-mode fibers”, University of Gent, 2003.
- [15] D. Taillaert, Frederik Van Laere et al., “Grating couplers for coupling optical fibers and nanophotonic waveguides”, Invited paper, Japanese Journal of Applied Phycis, vol. 45, n° 8A, 2006.

- [16] Frederik Van Laere, Günter Roelkens et al. "Compact and Highly Efficient Grating Couplers between optical fibers and nanophotonic waveguides", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, nº 1, 2007.
- [17] Stijn Scheerlinck, Frederik Van Laere, et al. "Gold grating couplers for Silicon-on-Insulator waveguides with 34% coupling efficiency", *OFC conference 2007*.
- [18] A. Sure, T. Dillon, J. Murakowski, C. Lin, D. Pustai and D. W. Prather, "Fabrication and characterization of three-dimensional silicon tapers," *Optics Express* 26, 3555-3561 (2003).
- [19] D. Dai, S. He, and H. K. Tsang, "Bilevel mode converter between a silicon nanowire waveguide and a larger waveguide," *IEEE J. Lightwave Technol.* 24 2418-2433 (2006).
- [20] Vilson R. Almeida, Roberto R. Panepucci and Michal Lipson, "Nanotaper for compact mode conversion", *Optics Letters*, vol. 28, nº 15, 2003.
- [21] Kevin K. Lee, desmond R. Lim et al., "Mode transformer for miniaturized optical circuits", *Optics Letters*, vol. 30, nº 5, 2005.
- [22] G. Roelkens, P. Dumon et al., "Efficient Silicon-on-Insulator fiber coupler fabricated using 248nm deep UV lithography".
- [23] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House 1995.
- [24] J. V. Galán, P. Sanchis, G. Sánchez, and J. Martí, "Polarization insensitive low-loss coupling technique between SOI waveguides and high mode field diameter single-mode fibers", *Optics Express*, vol. 15, nº 11, 7058-7065, 2007.